

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

Prof. Dr. Hugo Corres Peiretti
Dr. Javier León González



1. Introducción y objeto

Es una buena noticia que la humanidad vuelva sus ojos al patrimonio edificado con la idea de revitalizarlo y usarlo. En el contexto de una sociedad que, aun salpicada de terribles paradojas, ve prolongar la esperanza de vida de sus individuos, se está produciendo un interesante fenómeno tendente a alargar también la vida útil de las “máquinas para vivir, pensar y trabajar” —parafraseando a Le Corbusier— que son los edificios construidos. La actividad en ese terreno no se guía sólo por “amor al arte” —que también—, sino que comporta una notable actividad económica con repercusiones urbanísticas, sociales y, esto es lo que se quiere resaltar aquí, también técnicas.

Se presenta en primer lugar el contexto que rodea al técnico que participa en un proceso de intervención en el patrimonio, la variada casuística que se le puede presentar, el marco en el que debe entender la estructura existente y las herramientas de que dispone para estudiarla y, a la luz de experiencias vividas, algunas recomendaciones de las que, quizás, otros puedan extraer alguna enseñanza o plantear alguna crítica, en un ámbito aún abierto.

Como en otros artículos de los mismos autores, se pretende también aquí reivindicar el extraordinario papel de los ingenieros y los arquitectos (no importa el orden) dedicados a la conservación y resaltar los aspectos específicos de esta faceta de la ciencia de la construcción, en sintonía con los redivivos conceptos de lo “sostenible”.

2. El contexto técnico

Uno de los pioneros en el análisis de construcciones existentes fue Klaus Pieper [1], quien publicó un interesantísimo libro en 1982 fruto de su rica y global experiencia en la materia. Empieza este autor por decir que el deterioro progresivo y la destrucción son algo inevitable, como sucede con la vida del propio ser humano (figura 1).

¹ Según el DRAE: “Sostenible.- adj. Dicho de un proceso: Que puede mantenerse por sí mismo, como lo hace, p. ej., un desarrollo económico sin ayuda exterior ni merma de los recursos existentes.”

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

Interesa también de Pieper la visión de cómo el patrimonio arquitectónico forma parte de la historia de las sociedades de las que ha sido contenido y continente, de tal forma que, a lo largo del tiempo, se han ido incorporando nuevas construcciones cuya permanencia debe ser un legado que entregar a las siguientes generaciones (figura 2). Esos aspectos formales y materiales también atañen a la estructura que da soporte a los edificios.

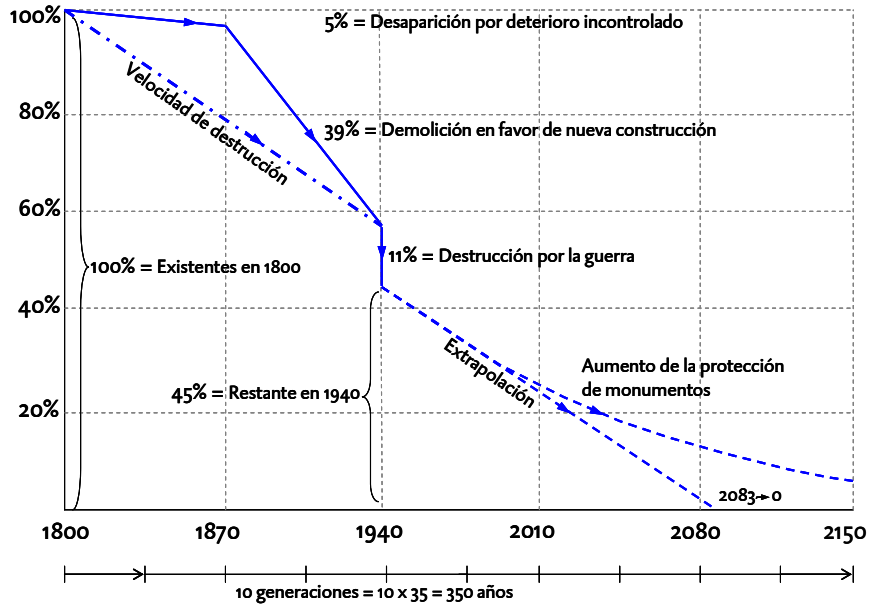


Figura 1. Expresión del deterioro del patrimonio arquitectónico en función del tiempo [1]. Se refiere a la ciudad de Lübeck, tomando como 100% de partida el patrimonio existente en 1800.

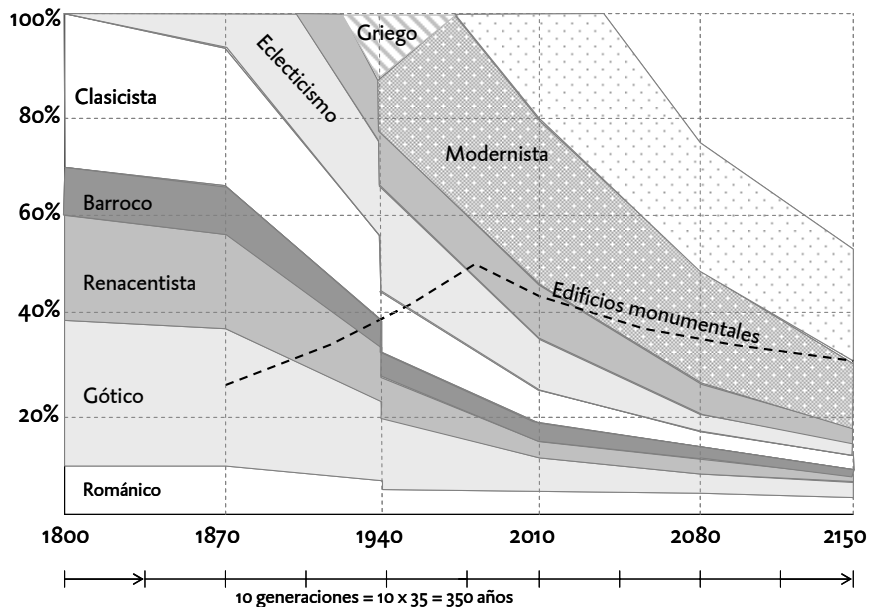


Figura 2. Porción relativa de las construcciones por períodos en función del tiempo [1]. Se refiere a la ciudad de Lübeck, tomando como 100% de partida el patrimonio existente en 1800.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

La figura 3 muestra el diagrama propuesto por el prof. Franco Mola [2], otro ideólogo de la intervención estructural en el patrimonio construido. En abscisas se representa el tiempo transcurrido desde el final de la construcción (instante t_0) en adelante y, en ordenadas, un índice de la resistencia R y de la sollicitación S^2 . La misma figura muestra varias posibilidades para la vida de la construcción. A partir del instante t_0 , comienza un inexorable proceso de degradación de la resistencia (curva $R(t)$), mientras las sollicitaciones, en general, crecen (curva $S(t)$). Una historia "natural" sería la descrita hasta el punto D: La sollicitación S crece con el tiempo mientras la resistencia R se degrada por causas naturales a un ritmo normal. En este caso, la vida de la estructura sería T_L . Con el fin de que la vida útil pueda ser prolongada, es decir, la distancia entre R y S se mantenga "razonablemente", habrá sido preciso que, en sucesivos instantes t_1, t_2, t_3 se hayan realizado intervenciones de reparación que habrán situado la diferencia $R - S$ en valores satisfactorios. En estos casos, la vida útil de la estructura alcanzaría los valores T_{1L}, T_{2L}, T_{3L} , en los puntos A, B y C respectivamente, siempre mayores que T_L , o que T'_L , consecuencia, p.e., de una acción no prevista.

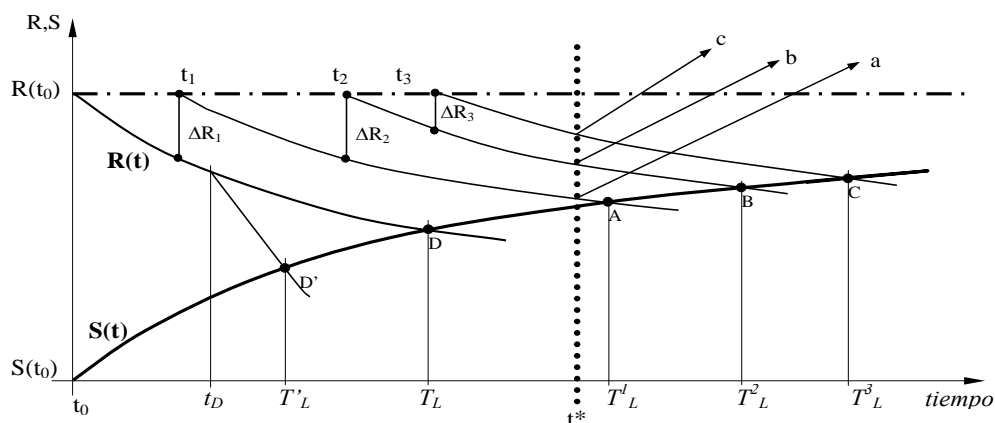


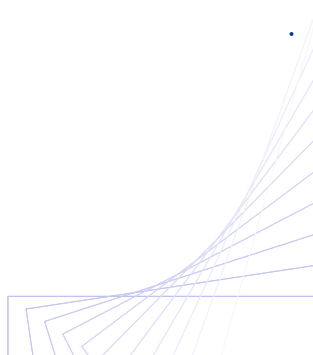
Figura 3. Evolución de sollicitaciones y resistencias de la misma a lo largo del tiempo.

Debe observarse que la gestión del concepto $R - S$, plagado de incertidumbres, es netamente ingenieril y vinculada, obviamente, a la ingeniería de estructuras, aunque implica a otras variadas disciplinas (etiología de daños, materiales, equipamientos, historia, geología, geotecnia, etc.). En estas tareas los ingenieros y los arquitectos, sin un marco normativo que les ampare, han de hacer uso de su experiencia y buen juicio (mezcla de pragmatismo, conocimientos u oficio, escepticismo y prudencia).

Resulta comprensible que, sin intervenciones, la curva $R(t)$ sea decreciente en el tiempo. Sin embargo, resulta menos evidente que sean crecientes las sollicitaciones $S(t)$. A los frecuentes recorridos e inserciones hay que agregar otras causas como alteraciones en el empuje del terreno, los cambios de uso o el aumento de las cargas muertas y las

² Las resistencias y las sollicitaciones deben entenderse en sentido amplio: acciones mecánicas, durabilidad, seguridad del usuario, etc.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios



sobrecargas, el aumento de la contaminación ambiental, de vibraciones por el tráfico, etc. Una posibilidad alternativa a la de intervenir sobre la resistencia (curvas de resistencia R incrementada a , b ó c) sería disminuir el nivel de sollicitación S , dado que también así se aumenta la vida T_L . Las medidas pueden ser desde alejar el tráfico rodado de la construcción hasta descargar la estructura confiando su labor resistente a una nueva estructura oculta. Se trata, sin duda, de casos extremos.

La figura 3 aporta otro motivo de reflexión. La escala del eje de tiempos indica que la intervención del técnico es sólo un hito más en el proceso de interacción entre la obra y sus constructores y mantenedores o modificadores, lo que el prof. Mola denomina “un continuo acto de amor”. Bajo esta perspectiva, el horizonte del análisis puede ser similar a los 50 ó 100 años de las estructuras nuevas. Después, si la intervención ha sido respetuosa y reversible, otra generación más preparada se enfrentará al problema en algún instante t^* . El referido diagrama puede describir, con suerte, la historia parcial de un elemento estructural o de una parte del edificio, pero no siempre el de una construcción en su conjunto. Para empezar, no existe un único instante t_0 , sino un proceso constructivo prolongado en el que la construcción crece, se desarrolla, modifica e interacciona consigo misma. Las reparaciones pueden empezar en ciertas zonas antes de completarse otras. Incluso es frecuente que unas construcciones se funden sobre otras.

Sólo por citar algunos ejemplos (figura 4), piénsese en la Giralda de Sevilla con el airoso recrecido de Hernán Ruíz, la drástica inclusión de la Catedral de Córdoba en el cuerpo de la mezquita, la fachada-contrafuerte neogótica del s. XIX de la Catedral de Palma de Mallorca o el paradigmático del caso de la Catedral de León [3], que acumula cimentaciones romanas, alto-medievales, románicas y góticas. Sin acudir a ejemplos de tan alta alcornia, basta pensar en el modesto edificio en el que se alberga la oficina de los autores de este artículo, en la calle Barquillo de Madrid, objeto, como tantos otros, de continuas reformas a lo largo de su vida, que supusieron importantes modificaciones en la configuración de la estructura y en las cargas aplicadas (sucesivas repavimentaciones y rellenos para disimular las flechas diferidas de los forjados de madera), más sobrecargas de bibliotecas, oficinas,...

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios



Figura 4. Ejemplo de superposiciones e inserciones como las del Ponte Vecchio en Florencia, la Giralda de Sevilla, la Mezquita de Córdoba, la fachada-estribo de la Catedral de Palma, la Catedral de León o un edificio del s. XIX en Madrid.

La figura 5 presenta un esquema típico de las fases por las que atraviesa el proceso de gestión del patrimonio construido. Se ha dibujado en paralelo con el ciclo de actividades que, desde un planteamiento clásico, se llevan a cabo en el ámbito de la Medicina y, por extensión, con las construcciones. El planteamiento es clásico (Pieper [1]) y “humano”, fácilmente comprensible. Al diagrama anterior preceden las fases de concepción del proyecto y de su ejecución, obviamente superadas al intervenir los técnicos de mantenimiento y de rehabilitación, y seguirían las de muerte y autopsia, temas tabú, pero inexorables y constituyentes de una gran fuente de enseñanzas. Merece la pena recorrer, siquiera brevemente, esas etapas:

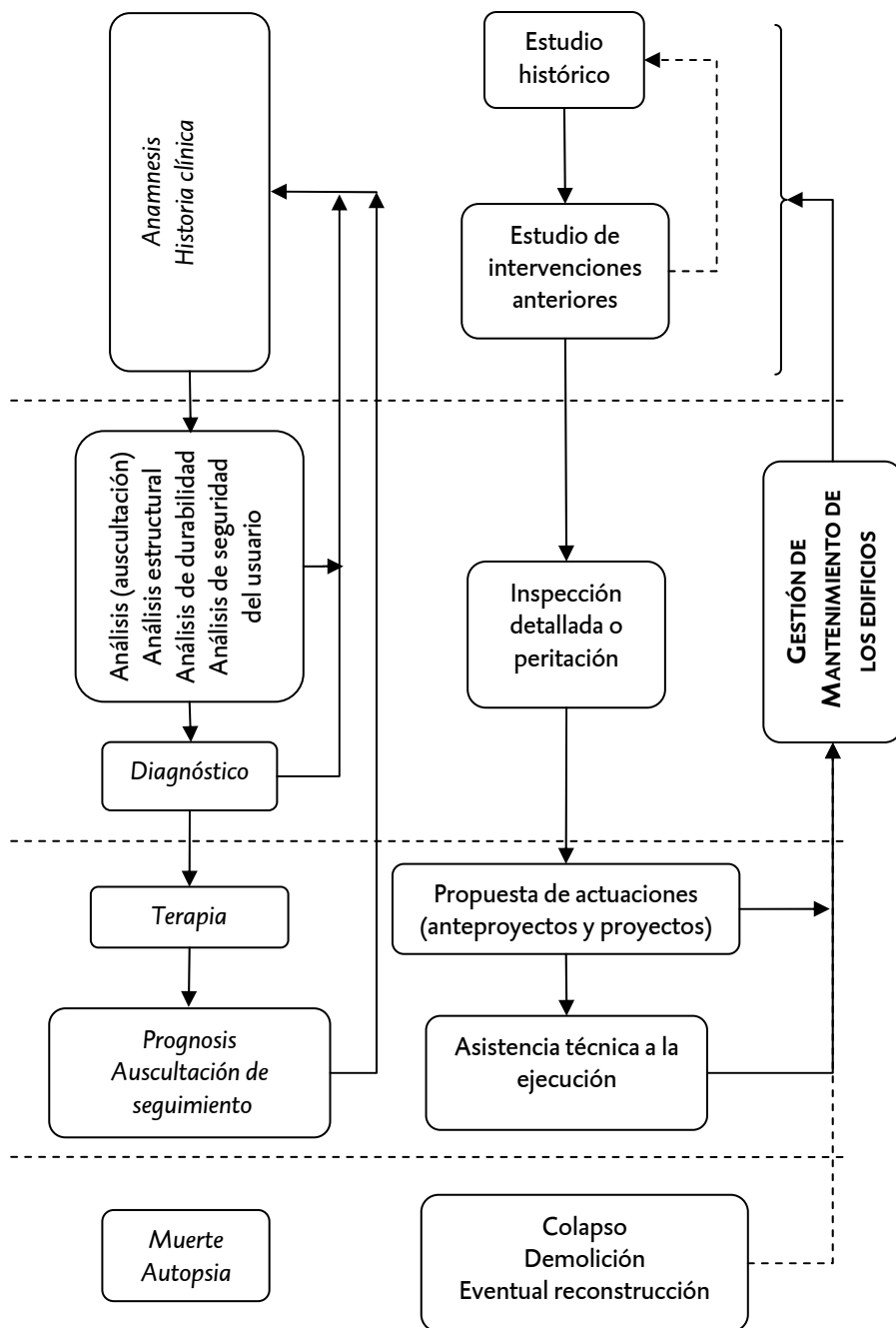
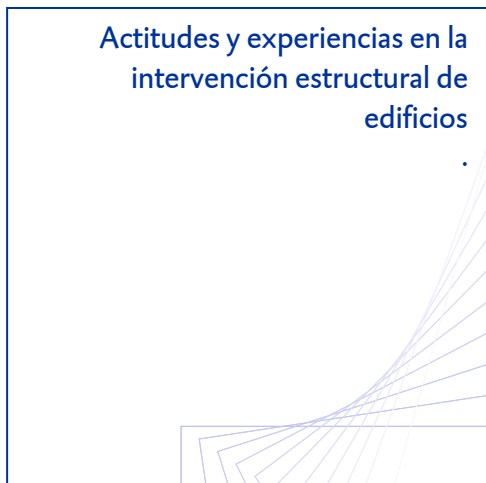
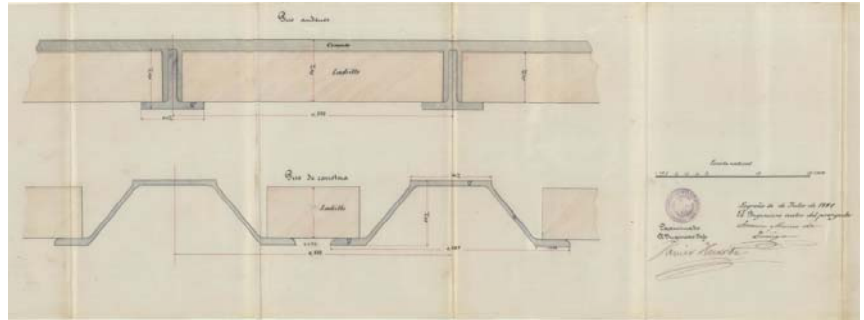


Figura 5. Ciclo vital de las estructuras a partir del instante de su construcción.

La **anamnesis** es la historia clínica. En efecto, tanto un profesional de la Medicina como un técnico que se enfrenta a un caso clínico, deben conocer los antecedentes, la historia del paciente —el edificio—. No se trata de un interés erudito o historicista, sino de reunir la relación de datos disponibles sobre la historia del edificio, su proceso constructivo, las reparaciones, daños e incidencias que se hayan sucedido a lo largo del tiempo. Es una actuación que da un extraordinario valor al conocimiento estructural y de durabilidad del edificio, al tiempo que permite valorar y agradecer a nuestros antecesores la gran labor realizada. Es curioso, a

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

este respecto, que se conserven más los buenos trabajos que los malos, cuyo legado es sólo la prueba del delito, sin documentos. Entre la información de extraordinaria utilidad (figura 6) se encuentran el proyecto, los documentos de pago (albaranes y facturas) y, con reservas, recortes de prensa acerca de ciertas intervenciones. Suelen ser más fidedignas las fotos antiguas.



Indicación del presupuesto de ejecución material y del que se propone para la formación del presupuesto adicional.

| Presupuesto Aprobado | Presupuesto | Cantidades que se proponen para la formación del presupuesto reformado. | Presupuesto |
|---|-------------|---|-------------|
| | Pesetas | | Pesetas |
| Artículo 1º - Exploración | 18.541,34 | Artículo 1º - Exploración | 45.500,00 |
| Artículo 2º - Obras de fábrica | 101.592,52 | Artículo 2º - Obras de fábrica | 189.000,00 |
| Artículo 3º - Afirmado | 44.930,75 | Artículo 3º - Afirmado | 46.000,00 |
| Artículo 4º - Obras accesorias | 14.577,17 | Artículo 4º - Obras accesorias | 28.000,00 |
| Artículo 5º - Conservación y acopios | 7.640,30 | Artículo 5º - Conservación y acopios | 7.800,00 |
| Importe del presupuesto de ejecución material | 187.270,58 | Importe del presupuesto de ejecución material aproximado | 316.300,00 |
| Aumento del 0,15 | 28.093,59 | Aumento del 0,15 | 47.445,00 |
| Presupuesto de contrato | 215.364,17 | Importe del presupuesto de contrato reformado | 363.745,00 |

| Resumen | | Presupuesto | |
|--|------------|--------------------|------------|
| | | Ejecución material | Contrata |
| Importe del presupuesto aprobado | 215.364,17 | 187.270,58 | 215.364,17 |
| Coste del presupuesto aprobado y reformado | 363.745,00 | 316.300,00 | 363.745,00 |
| Importe del presupuesto adicional | 129.000,00 | 129.000,00 | 129.000,00 |

El Sr. D.º El Arquero Inf. Navarresa 1º de Julio de 1884 El Ingeniero en cargo don Juan Castela

Figura 6. Fragmento de un proyecto. Del conocimiento o estimación de la época se pueden deducir datos tan valiosos como la naturaleza y resistencia de los materiales o las cargas utilizadas en el proyecto.

El **análisis** es el estudio cuantitativo de sus aspectos particulares. Ha de partir de la información preliminar recogida en la anamnesis. El análisis comprende dos actuaciones: la experimental (ensayos mecánicos —destructivos o no destructivos—, petrográficos, de durabilidad, de compatibilidad frente a eventuales tratamientos o materiales de reparación, etc., figura 7) y la numérica, mediante modelos de diferente nivel de sofisticación (figura 8), con el propósito fundamental de entender el funcionamiento de la estructura y, después, detectar coincidencias entre los daños observados y las zonas de máximas sollicitaciones, para diferentes hipótesis, así como evaluar el nivel de seguridad, siquiera de manera aproximada, tanto en condiciones de uso o en situaciones transitorias durante las operaciones de reparación o refuerzo, frente a los diferentes modos de fallo posibles etc. Un análisis

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

numérico deberá comprender modelos de varios tipos y estará seguido de un estudio de sensibilidad que permita calibrar la influencia que la variabilidad de los parámetros geométricos o mecánicos de la estructura tienen en la respuesta de ésta.

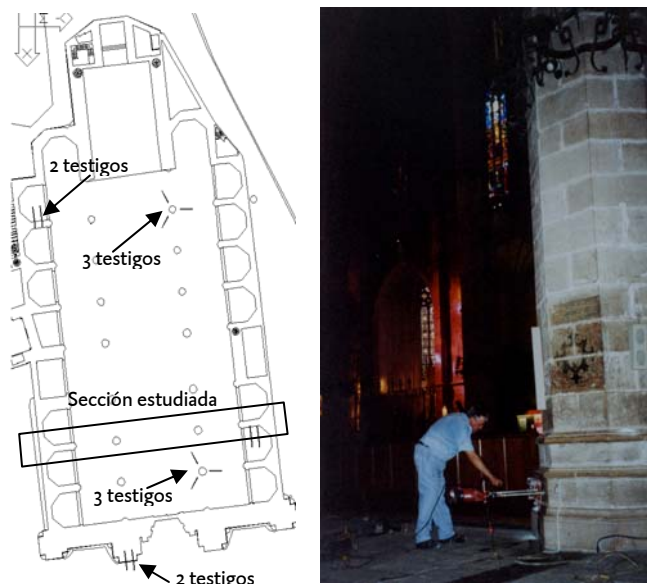


Figura 7. Planta de la Catedral de Palma. Sección analizada y ubicación de los puntos de extracción de testigos (trabajos de FHECOR-INTEMAC 2000).

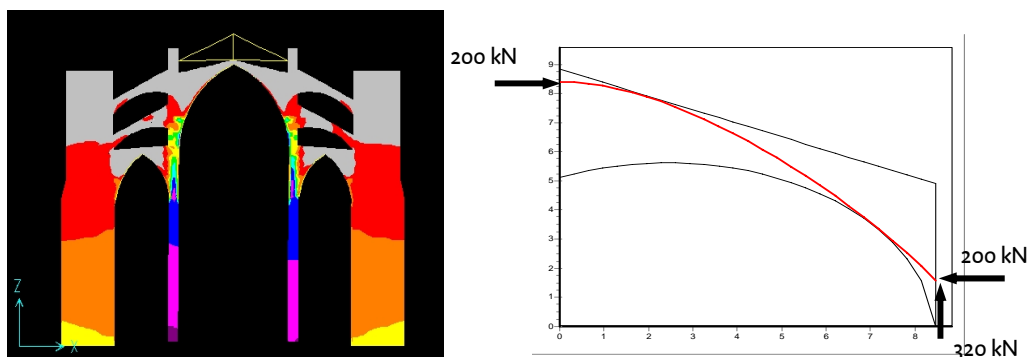


Figura 8. Catedral de Palma de Mallorca. Análisis plano de la sección transversal de la (modelo de elementos finitos) y estudio de un arbotante bajo mediante técnicas de análisis límite.

La **diagnosis** es la acción y efecto de recoger y analizar datos para evaluar los problemas de diversa naturaleza que afectan a la estructura y sus materiales y que se manifiestan en los daños o insuficiencias detectadas. En el ámbito de la Medicina se dice que una buena *anamnesis* constituye ya la mitad de la *diagnosis*, lo que es también cierto en el mundo del estudio estructural de construcciones. La otra mitad es fruto del análisis y de la experiencia. El técnico deberá prestar atención, en todo caso, al hecho frecuente de que no hay una sola causa, sino un cúmulo de ellas, de orígenes diferentes, cuyo alcance y consecuencias deberán tenerse muy presentes para no incurrir en errores en el análisis estructural

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

y en distorsiones en la interpretación de los datos proporcionados por la auscultación. La diagnosis constituye una fase crítica del proceso: en la medida en que el técnico haya entendido bien la estructura, se haya introducido en su “organismo”, estará en condiciones de explicar los males que le aquejan (figura 9).



Figura 9. Efecto producido por la corrosión de unos viejos perfiles metálicos (dispuestos durante la construcción en 1899) en unos dinteles de un edificio oficial. Obsérvese la fisuración de los canes y el estado de corrosión de los perfiles, una vez retiradas las metopas. Trabajo de los autores (2000).

La **terapia** es el conjunto de medidas encaminadas a dar solución a los problemas previamente diagnosticados. La ejecución de medidas terapéuticas (figura 10) debe ser el resultado de un diagnóstico profundo y razonablemente certero si se desea contar con alguna garantía de éxito. Decir que las medidas correctoras deben aplicarse a las zonas que verdaderamente precisen la intervención puede parecer una obviedad, pero es muy frecuente, por desgracia, actuar de manera ciega y generalizadora, en la línea, aparentemente eficiente, de tapar el problema —no de resolverlo—, sin más consideraciones. Esta es una forma de actuar bastante extendida y viciada de origen porque, si bien se justifica el gasto realizado, no es menos cierto que se hace sin garantía de haber resuelto el problema, lo que comporta el riesgo (para otros) de tener que volver a estudiarlo y repararlo con mejor criterio. A ello se añade, además, el que actuaciones cosméticas de este tipo entorpecen y hasta imposibilitan diagnósticos futuros.



Figura 10. Sustitución de los perfiles metálicos de la figura 9 por uno de hormigón en el que la armadura es sólo de control de fisuración. Trabajo de los autores (2000).

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

Cabe un matiz más en esta cuestión: han de analizarse con sentido crítico, comprensivo (y comprensivo con los errores y aciertos) las actuaciones terapéuticas de los técnicos que intervinieron en el pasado. La actitud en esta parte del trabajo debe ser especialmente humilde, valorando el trabajo del pasado, y desprovista de soberbia: al fin y al cabo es más que previsible que otros técnicos del futuro lo harán mejor, y a quienes es obligado dejar despejado y documentado el camino.

La **prognosis** o pronóstico es, por un lado, el principal aspecto a considerar para tomar una decisión sobre la necesidad y el alcance de una medida de intervención y, por otro, la fase posterior a esta intervención (terapia) o al diagnóstico si tras éste se decide no aplicar medida correctora alguna pero, con buen criterio, se decide hacer un seguimiento de los acontecimientos o, en su caso, de la bondad del tratamiento aplicado. El equipo autor de una intervención debe preguntarse por la eficacia y perdurabilidad de las medidas propuestas. Incluso el no intervenir debe ser una decisión sujeta a esta misma pregunta. La única respuesta fiable, sin renegar, naturalmente, de las experiencias previas propias o ajenas, es la que proporciona la monitorización basada en la auscultación previa o dispuesta *ad hoc* (figura 11). No debe sorprender que el resultado de la *prognosis* pueda comportar una revisión de la *terapia* aplicada, lo que exigiría a su vez la revisión de la *diagnosis*, del *análisis* y hasta la ampliación de la *anamnesis* en ciertos aspectos. Naturalmente, el riesgo de volver sobre los pasos dados decrece en la medida en que hayan sido atinados y suficientemente profundos los pasos anteriores.



Figura 11. Auscultación en la Catedral de León después de la intervención de 1999 en la Silla de la Reina.

Finalmente, la **autopsia** es (lo ha sido siempre) una inmejorable ocasión para el aprendizaje. Superado el impacto inicial de un colapso imprevisto, al margen de aspectos judiciales y de depuración de responsabilidades, el técnico tiene la oportunidad de examinar qué

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

sucedió, cómo sucedió y qué lecciones se aprenden de lo acaecido. Baste, a título de ejemplo, el caso de una de las cúpulas de la iglesia de Santo Tomás de Villanueva, en Zaragoza (2001) (figura 12). La arquitecto autora del proyecto de rehabilitación asumió con valentía el examen de los sucedido, lo que permitió diagnosticar con razonable verosimilitud la secuencia y la causa de los hechos y, lo que es más importante, permitió modificar el proceso de ejecución previsto inicialmente para otras cúpulas gemelas, para considerar la naturaleza y estado de los rellenos del trasdós, así como la muy mala calidad de las fábricas y la drástica caída de resistencia (la décima parte) de la fábrica en presencia de humedad y la reducción a la tercera parte del módulo de deformación longitudinal.

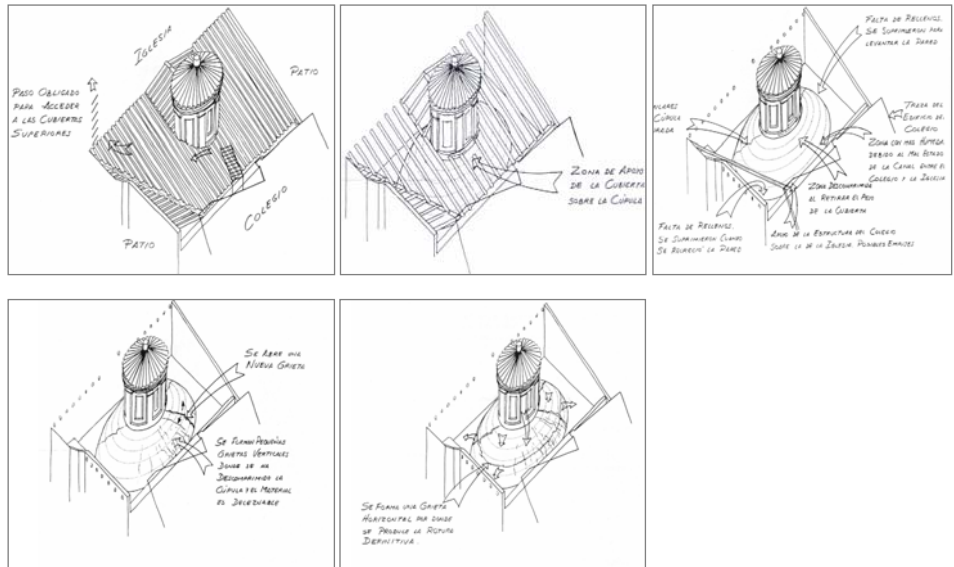


Figura 12. Secuencia del colapso de una de las cúpulas elípticas de la iglesia de Santo Tomás de Villanueva (La Mantería) en Zaragoza (2001). (1) Vista del tejado antes de la intervención. (2 y 3) Eliminación progresiva de la techumbre; ausencia de rellenos rígidos en los extremos del eje mayor. (4) Aparición de grietas según los meridianos. (5) Poco antes del colapso, aparición de una gran grieta según un paralelo al borde del relleno rígido; la linterna gira y cae al interior.

En la figura 13 se muestran el colapso y la posición de unas grietas horizontales en las cúpulas gemelas, situadas en la misma posición que en la cúpula colapsada.



Figura 13. La experiencia y el estudio de la cúpula colapsada (figura inferior) permitió inferir la existencia, confirmada, de grietas según el paralelo en otra cúpula gemela de la misma iglesia (figura superior). Santo Tomás de Villanueva (Zaragoza). Trabajo de los autores [11].

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

Otra prueba de la potencia pedagógica de la advertencia de un mecanismo de colapso es la de la figura 14, que, por fortuna, fue sólo la explicación del arquitecto Fendrich a los responsables de la Catedral de Lübeck [1] para que emprendieran a tiempo medidas correctoras.

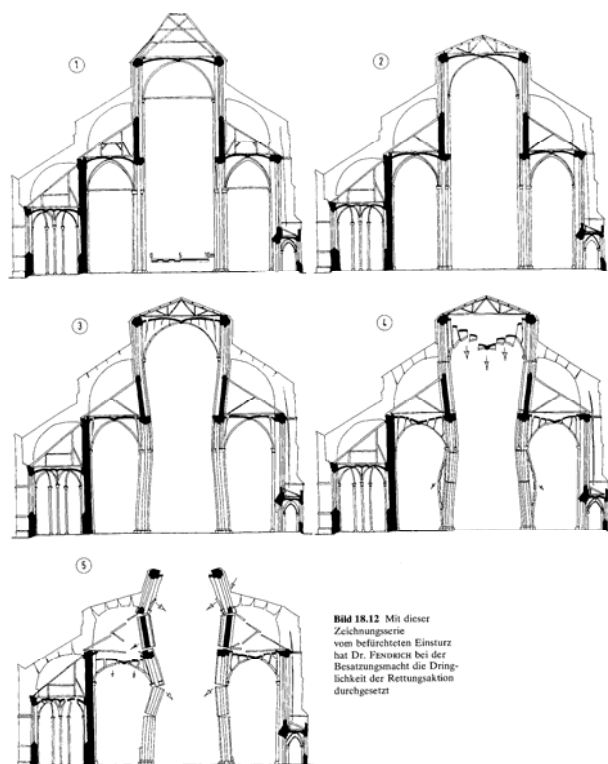


Figura 14. Evolución de las deformaciones hasta el colapso de la sección tipo de la Catedral de Lübeck según Fendrich, recogido por Pieper [1].

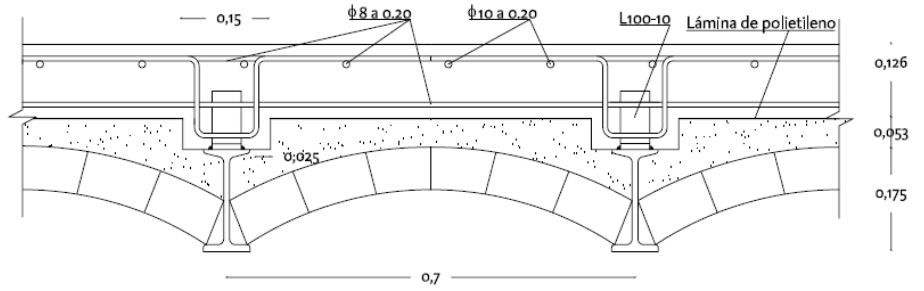
3. Peculiaridades de esta actividad

No es difícil detectar en esta actividad rasgos claramente diferenciados con respecto a la labor del arquitecto o ingeniero estructural “convencional”. Cabe señalar, de entrada, que existe una notable diversidad de términos para referirse a esta tarea, con sutiles matices diferenciadores entre ellos: *consolidación, reparación, refuerzo, restauración, rehabilitación*. En inglés, el término *assessment* ha cobrado carta de naturaleza, o el alemán *Sicherungsarbeiten* (trabajos de aseguramiento, literalmente). Llama la atención el término ruso *Перестройка (perestroika)*, que dio nombre a la política de Gorbachov con la que quiso “rehabilitar” el viejo edificio soviético.

Particularidades técnicas

Junto a edificios modernos, o relativamente modernos, de tipologías asimilables a las hoy consideradas convencionales (figura 15), el técnico puede encontrarse con estructuras muy diferentes (figura 16) de las habituales en tipologías, materiales y sollicitaciones.

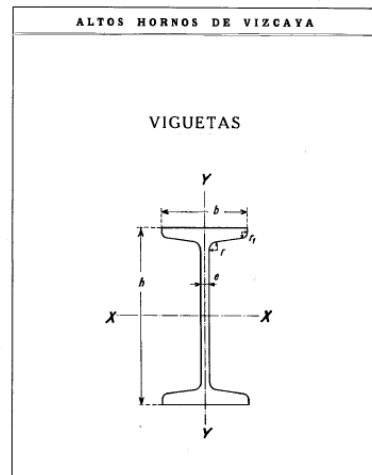
Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios



ALTOS HORNOS DE VIZCAYA

NOTACIONES

A = Sección bruta.
 A_n = " neta.
 p = Peso en Kgs. por metro.
 I = Momento de inercia de la sección bruta.
 I_n = " " neta.
 R = " resistente de la sección bruta.
 R_n = " " neta.
 i = Radio de giro = $\sqrt{\frac{I}{A}}$.
 d_1 = Diámetro máx. del agujero.
 h_1 = Parte recta del alma en I y Γ .
 E = Módulo de elasticidad.
 f = Flecha.
 o = Coeficiente de trabajo a tracción o compresión.



ALTOS HORNOS DE VIZCAYA

I NORMAL

| Perfil | Dimensiones en mm | | | | | | | Sección | | Peso p | Acabado | Sección neta |
|--------|-------------------|-----|------|------|----------------|-----|------|---------|-----|--------|---------|--------------|
| | h | b | e-r | r | d ₁ | A | I | | | | | |
| 8 | 80 | 42 | 3.9 | 5.9 | 2.3 | 66 | 7.25 | 1,65 | 21 | — | — | |
| 10 | 100 | 50 | 4.3 | 6.8 | 2.7 | 73 | 10.0 | 2,32 | 26 | — | — | |
| 12 | 130 | 58 | 5.1 | 7.7 | 3.1 | 90 | 14.2 | 3,11 | 30 | — | — | |
| 14 | 140 | 66 | 5.7 | 8.6 | 3.4 | 109 | 18.3 | 4,14 | 34 | 11 | 14.6 | |
| 16 | 160 | 74 | 6.3 | 9.5 | 3.8 | 125 | 22.8 | 5,49 | 38 | 14 | 17.5 | |
| 17* | 175 | 80 | 10.0 | 12.0 | 5.0 | 120 | 26.0 | 6,42 | 42 | 14 | 20.3 | |
| 18 | 180 | 81 | 6.9 | 10.4 | 4.1 | 142 | 27.9 | 7,19 | 44 | 14 | 22.2 | |
| 20 | 200 | 90 | 7.3 | 11.3 | 4.5 | 159 | 33.5 | 9,63 | 46 | 17 | 25.9 | |
| 22 | 210 | 98 | 8.1 | 12.2 | 4.9 | 175 | 39.6 | 12,8 | 52 | 17 | 31.4 | |
| 24 | 240 | 106 | 8.7 | 13.1 | 5.2 | 190 | 49.1 | 17,2 | 59 | 17 | 35.3 | |
| 25* | 250 | 110 | 10.0 | 12.7 | 5.4 | 200 | 49.5 | 17,4 | 58 | 20 | 40.1 | |
| 28 | 280 | 113 | 9.4 | 14.1 | 5.6 | 208 | 53.4 | 19,1 | 58 | 20 | 42.3 | |
| 30 | 300 | 119 | 10.1 | 15.2 | 6.1 | 225 | 61.1 | 22,0 | 62 | 20 | 46.1 | |
| 32 | 300 | 123 | 10.8 | 16.0 | 6.5 | 240 | 62.1 | 22,2 | 64 | 20 | 46.2 | |
| 33 | 320 | 131 | 11.5 | 17.3 | 6.9 | 257 | 72.8 | 27,8 | 70 | 20 | 54.2 | |
| 34 | 340 | 137 | 12.2 | 18.3 | 7.3 | 274 | 86.8 | 33,1 | 74 | 20 | 62.5 | |
| 35 | 350 | 143 | 13.0 | 19.5 | 7.8 | 290 | 92.1 | 35,2 | 74 | 23 | 70.3 | |
| 38 | 380 | 149 | 13.7 | 20.3 | 8.2 | 306 | 107 | 40,0 | 80 | 23 | 88.5 | |
| 40 | 400 | 155 | 14.4 | 21.6 | 8.6 | 323 | 118 | 43,6 | 84 | 23 | 98.5 | |
| 42 1/2 | 425 | 163 | 15.3 | 23.0 | 9.2 | 343 | 132 | 48,4 | 90 | 26 | 108 | |
| 45 | 450 | 170 | 16.2 | 24.3 | 9.7 | 363 | 147 | 53,2 | 96 | 26 | 122 | |
| 47 1/2 | 475 | 178 | 17.1 | 25.6 | 10.3 | 384 | 163 | 58,0 | 96 | 26 | 137 | |
| 50 | 500 | 185 | 18.0 | 27.0 | 10.8 | 404 | 180 | 63,8 | 100 | 26 | 152 | |

* Especial.

ALTOS HORNOS DE VIZCAYA

| Perfil | Referido al eje X-X | | | | Referido al eje Y-Y | | | | R ₁ | R ₂ | |
|--------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|--------|
| | I _x | I _y | I _{xx} | I _{yy} | I _x | I _y | I _{xx} | I _{yy} | | | |
| 27.8 | 19.5 | 3.20 | — | — | 6.20 | 3.00 | 0.81 | — | — | 6.50 | 8 |
| 171 | 36.2 | 4.01 | — | — | 12.2 | 4.88 | 1.97 | — | — | 7.01 | 10 |
| 328 | 56.7 | 4.81 | — | — | 21.5 | 7.41 | 3.23 | — | — | 7.38 | 12 |
| 573* | 81.9 | 5.01 | 4.11 | 35.7 | 35.2 | 10.7 | 3.40 | 24.0 | 2.27 | 7.60 | 16 |
| 925 | 117 | 6.40 | 6.35 | 79.4 | 54.9 | 14.8 | 5.38 | 34.8 | 9.40 | 7.81 | 18 |
| 1341 | 176 | 6.54 | 10.99 | 159 | 158 | 39.3 | 12.7 | 35.8 | 12.7 | 8.15 | 20 |
| 1450 | 191 | 7.30 | 10.40 | 110 | 81.3 | 39.8 | 1.71 | 32.8 | 18.9 | 8.15 | 18 |
| 2140 | 214 | 8.00 | 14.00 | 140 | 112 | 20.0 | 1.87 | 24.8 | 16.6 | 8.23 | 20 |
| 3060 | 278 | 8.80 | 21.80 | 198 | 162 | 33.7 | 3.02 | 19.0 | 11.4 | 8.40 | 22 |
| 4150 | 354 | 9.59 | 31.80 | 260 | 221 | 41.7 | 3.20 | 19.0 | 28.3 | 8.49 | 24 |
| 4679 | 376 | 10.71 | 34.00 | 272 | 245 | 44.5 | 3.22 | 19.5 | 30.0 | 8.40 | 25* |
| 5740 | 442 | 10.4 | 40.40 | 314 | 288 | 51.0 | 3.22 | 19.0 | 33.7 | 8.27 | 26 |
| 7290 | 540 | 11.1 | 54.80 | 391 | 384 | 61.2 | 3.45 | 24.5 | 42.1 | 8.04 | 28 |
| 9800 | 658 | 11.9 | 72.00 | 480 | 451 | 72.2 | 3.46 | 31.5 | 50.4 | 8.04 | 30 |
| 12510 | 788 | 12.7 | 93.00 | 577 | 555 | 84.7 | 3.47 | 38.4 | 58.6 | 8.23 | 32 |
| 15000 | 925 | 13.5 | 116.00 | 704 | 674 | 98.0 | 3.40 | 47.3 | 69.1 | 8.28 | 34 |
| 19610 | 1090 | 14.2 | 144.90 | 863 | 818 | 114 | 3.40 | 59.7 | 79.3 | 8.58 | 36 |
| 24010 | 1280 | 15.0 | 180.10 | 1048 | 975 | 131 | 3.40 | 67.1 | 92.0 | 8.22 | 38 |
| 29310 | 1460 | 15.7 | 222.20 | 1210 | 1160 | 149 | 3.18 | 86.6 | 104 | 8.78 | 40 |
| 35970 | 1740 | 16.7 | 274.10 | 1390 | 1440 | 170 | 3.20 | 98.8 | 124 | 8.86 | 42 1/2 |
| 43850 | 2040 | 17.7 | 340.00 | 1540 | 1730 | 203 | 3.48 | 110.0 | 140 | 10.04 | 45 |
| 54880 | 2380 | 18.6 | 437.00 | 1820 | 2090 | 235 | 3.40 | 147.0 | 165 | 10.12 | 47 1/2 |
| 68740 | 2760 | 19.6 | 534.00 | 2130 | 2480 | 268 | 3.72 | 177.0 | 192 | 10.24 | 50 |

Figura 15. Ejemplo de refuerzo de un forjado unidireccional de 1906 en un hospital madrileño. Dada la imposibilidad de actuar por la cara inferior y que era posible, sin modificar la cota final del pavimento, actuar con una losa colaborante en la zona del relleno, se conectó la perfilaría la losa. Los perfiles respondían al catálogo de 1903 de Altos Hornos de Vizcaya.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios



Figura 16. Cúpula de Hagia Sofia, bóvedas de la Catedral de León, forjado de madera de un edificio en Madrid. Ejemplos de estructuras “poco habituales” en el quehacer de los técnicos de la construcción de hoy.

Destaca también la ausencia de datos —o existencia de incertidumbres en cuanto a la fiabilidad de la información existente— acerca de la configuración geométrica real de la estructura y de los elementos no estructurales (que, sin embargo, pesan), las propiedades resistentes de los materiales, las configuraciones de los enlaces, así como un largo y deprimente etcétera. A ello se une, como se comenta más adelante, la ausencia de normativa y de criterios consensuados o, mejor, consolidados como referencia objetiva. En efecto, se echa de menos el cómodo amparo de la reglamentación (que además exige de responsabilidad), y el hecho de que ésta establezca unas mismas reglas del juego a todos los profesionales, ordenando de alguna manera el mercado. La formación y buen oficio del técnico juegan aquí un papel auténticamente protagonista. La reflexión anterior conduciría a la necesidad de revisar contenidos en los programas docentes de las Escuelas Técnicas, o a impartir cursos de formación. Esa cuestión no se aborda aquí.

Aunque de importancia aparentemente secundaria, se da otra circunstancia curiosa: existe una jerga especial en este mundo de la arquitectura y la ingeniería “clásicas” que no siempre se ha enseñado bien, ni de igual manera entre profesionales³.

³ Valga como muestra la anécdota de que el Grupo de Trabajo de Puentes de Fábrica de la Asociación Técnica de la Carretera, que, antes de ponerse manos a la obra con cosas más técnicas, optó por elaborar un glosario de los términos principales de la jerga propia de ese microcosmos —pero cosmos en definitiva— que representan las obras de fábrica. En efecto, muchos diccionarios técnicos y ciertos glosarios están escritos por polígrafos sin el suficiente conocimiento de la materia técnica correspondiente. El objetivo fue, pues, producir un glosario para técnicos de un mismo país con una misma lengua, con el fin de organizar un vocabulario abandonado y frecuentemente mal empleado, lo que estaba produciendo una falta de entendimiento entre los profesionales.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

Particularidades circunstanciales

Por suerte, no es posible hacer abstracción de la técnica, olvidándose del resto de disciplinas y convirtiéndola en protagonista única, en el mundo complejo de la intervención en el patrimonio construido. También sucede eso en la arquitectura y la ingeniería dedicadas a la construcción de nueva planta, pero, con una singular variedad de matices, caben diferentes posturas filosóficas ante la restauración, como brillantemente expone Antoni González [4], lo que no debe resultar extraño ante una actuación que requiere un profundo conocimiento de la historia del edificio y, con frecuencia, de la sociedad que ha girado en torno a él y, por tanto, de aspectos sociales, e incluso políticos y religiosos. En definitiva, se le exige al equipo un ejercicio de difícil equilibrio entre el rigor, la interpretación subjetiva, lo funcional y lo aceptablemente económico. Naturalmente, el problema tiene muy diversas soluciones y la misión del equipo será elegir la solución de compromiso que, no siendo óptima, satisfaga razonablemente bien las premisas de partida en el momento de la intervención.

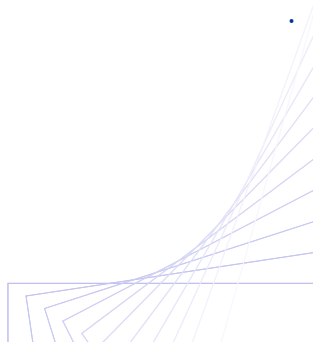
Un caso paradigmático es el de la Catedral de Palma de Mallorca (figura 28). La intervención de Gaudí supuso una ruptura estética escandalosa cuando se acometió, pero tanto la arrolladora profesionalidad del autor, como su convencimiento de que “actuaba poseído por el espíritu divino” hicieron posible devolver al templo el *ethos* de la catedral gótica desde la estética modernista, idealizada, desde luego, pero genial de su autor. Es en casos como éste cuando se percibe cómo el interventor se mueve sobre el delicado filo que separa, con aparente estrecho margen, la gloria del triunfo del abismo del bodrio.

Otro aspecto diferenciador de esta tarea con respecto a las “convencionales” de ingenieros y arquitectos es el de la gran diversidad de interlocutores y especialistas. Baste citar a la propiedad, al responsable del mantenimiento, al financiero, a los abogados, historiadores del arte y restauradores, a los arqueólogos, a otros arquitectos e ingenieros, a los geólogos y geotécnicos, a los topógrafos, a los físicos y químicos, especialistas en acústica, a los organistas, a los especialistas en protección contra el fuego, al constructor local, al jefe de obra y al encargado. No es, desde luego, tarea fácil, y hace ver la importancia de integrarse en un equipo multidisciplinar bajo la coordinación de un gerente con capacidad de liderazgo y de toma de decisiones.

Aspectos académicos y conceptuales

Como es sabido, el proyecto y construcción de una estructura de nueva planta (de hormigón, acero, fábrica, madera, etc.) se ve asistido por la existencia de un marco normativo que define, con diferentes grados de aproximación, los distintos estados límite que pueden situar la estructura o parte de ella al borde del incumplimiento de ciertas condiciones de utilización o de seguridad frente al colapso. En efecto, el cúmulo de estudios y experiencias obtenidas en esas estructuras ha permitido identificar cuáles son los límites de validez (corrimientos, fisuración,

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios



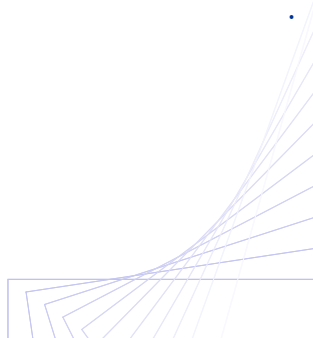
modos de rotura, etc.) de la estructura (R_d) y cuáles son las situaciones pésimas verosímiles de proyecto (S_d). Como se sabe, si se cumple la condición $S_d \leq R_d$, asociada a una cierta probabilidad de fallo, convenida aceptable, durante la “vida útil” de la estructura, ésta se considera satisfactoria. La labor del técnico autor de este tipo de cálculos se *ciñe*, pues, a efectuar la comparación entre los valores límite convencionales R_d y los solicitantes S_d , resultado de un cierto cálculo. Tanto para la definición de R_u como de S_d , existen procedimientos sancionados por la práctica que acotan convencionalmente el grado de incertidumbre.

Sin embargo, si se pretende juzgar la aceptabilidad de una construcción existente, el problema se torna mucho más complejo. El marco probabilista sigue siendo conceptualmente válido, pero hay tal grado de desconocimiento de la distribución de las variables de sollicitación y resistencias (S_d y R_d respectivamente), y tal variedad de tipologías, historias y magnitudes de cargas (destrucciones y reconstrucciones) y materiales que, en la práctica, no es posible cuantificar, con carácter general, el nivel de fiabilidad del análisis. Si el estudio se centra en una estructura concreta, el aludido cúmulo de incertidumbres se ve reducido desde un nivel infinito a uno simplemente enorme. Semejante situación no debe inducir al desánimo, pero es evidente que condiciona el alcance y la precisión del análisis o, dicho de otra forma, el técnico que haya de abordar el estudio habrá de añadir grandes dosis de crítica racional y sentido común a todo lo que plantee y obtenga.

Por otra parte, es un hecho también que el quehacer diario de la profesión de técnico en la construcción pasa inevitablemente, en mayor o menor medida, por la cuantificación y, en definitiva, por el análisis estructural, tanto para el proyecto como para la comprobación. A nadie sorprende que las armaduras, los detalles constructivos, las uniones, etc. y hasta la misma concepción estructural se vean asistidas por la obtención de esfuerzos y tensiones, fruto “enteléquico” pero muy útil del análisis estructural. No hay razón para que las obras históricas de fábrica de piedra, ladrillo, madera, etc. escapen a esta manera de proceder, incrustada en el *modus operandi* de los técnicos desde hace muchos años, aunque, evidentemente, los criterios, los procedimientos y las herramientas hayan evolucionado enormemente. Tampoco es deseo de los autores dar la impresión de que el cálculo es oráculo infalible, *per se*. Tan alejado de la realidad, si no más, puede estar un análisis estructural que ignore el comportamiento de los materiales, la existencia —oculta o no— de daños o las condiciones de vinculación, que una estimación cualitativa fundada en la impresión (la “pinta”) que la estructura ofrece al observador.

Sucede además, que las reglas y criterios de proyecto utilizados en el pasado, aunque han demostrado su utilidad por la vía de la estabilidad de las construcciones que salieron de las manos de sus constructores, no valen para validar estructuras existentes con cambios de uso y que, naturalmente, no tenían en cuenta el deterioro de los materiales. Aquellos procedimientos, válidos para proyectar y construir entonces no

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios



lo son ya para entender el funcionamiento de esas estructuras hoy y, menos aún, para pronunciarse acerca de su nivel de seguridad.

Los autores están persuadidos de que la unidad conceptual que se propugna para las estructuras, sean cuales sean sus materiales constitutivos y la tipología estructural en que éstos se integran, aconseja incluir en este marco de tratamiento las construcciones ya existentes, tanto de hormigón o acero, como de fábrica o de madera, por más que resulte complicado aceptar que estas construcciones de fábrica o madera no son un medio continuo, sino claramente discontinuo y anisótropo, con materiales que no por antiguos son más conocidos —antes al contrario— que otros más modernos como el hormigón.

Dígase, por cierto, que el hormigón constituye una excelente referencia para abordar, por similitud buscada, el estudio del comportamiento de las fábricas, así como el acero puede ser referencia para las de acero. Esta forma de proceder, la de transvasar los conocimientos de una disciplina a otra presuntamente similar no es nueva. Las construcciones metálicas de los tres primeros cuartos del s. XIX fueron el paradigma de la aplicación práctica de los conocimientos teóricos aportados por los Coulomb, Navier, Steiner, Mohr, Castigliano, etc. Cuando, a finales de esa misma centuria, se difunde el hormigón armado, se le aplican muchas de las hipótesis y procedimientos de las estructuras metálicas, lo que comportaba la asunción de hipótesis que pronto se evidenciaron claramente erróneas. Nacería, de este proceso, el estudio de las estructuras de hormigón con ciencia propia hasta llegar —especialmente con la implantación del método de los estados límite— a imponer una forma general de tratamiento que hoy está siendo aceptada en las estructuras metálicas, de madera y de fábrica de nueva planta.

Baste mencionar, a título de ejemplo, cómo los procedimientos basados en el trazado de bielas y tirantes que representan el campo de fuerzas resistentes ante las acciones exteriores, pueden concebirse también en el caso de estructuras de fábrica. En efecto, la figura 18 muestra el caso del dintel de la puerta central de la fachada oeste del monasterio de S. Lorenzo de El Escorial. Inicialmente, dicho dintel se comportó como una pieza empotrada en ambos extremos. Las acciones exteriores (peso propio y restante carga vertical) indujeron la aparición de “momentos flectores” en las secciones críticas (empotramiento y centro de vano) mayores que los respectivos “momentos de fisuración”, lo que queda puesto de manifiesto en las fisuras o grietas detectadas. Según el entendimiento “clásico” de la Resistencia de Materiales para piezas lineales, sin armadura, resultaría imposible asegurar el equilibrio, que resulta patente por otra parte. La respuesta hay que buscarla, obviamente, en la formación de un par de bielas inclinadas de compresión que, desde la zona comprimida superior del centro del vano, transmiten la compresión hacia la cara inferior de las secciones de apoyo. Los estribos, infinitamente rígidos, son capaces de proporcionar las fuerzas horizontales de contrarresto que equilibran las componentes horizontales de las citadas bielas.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

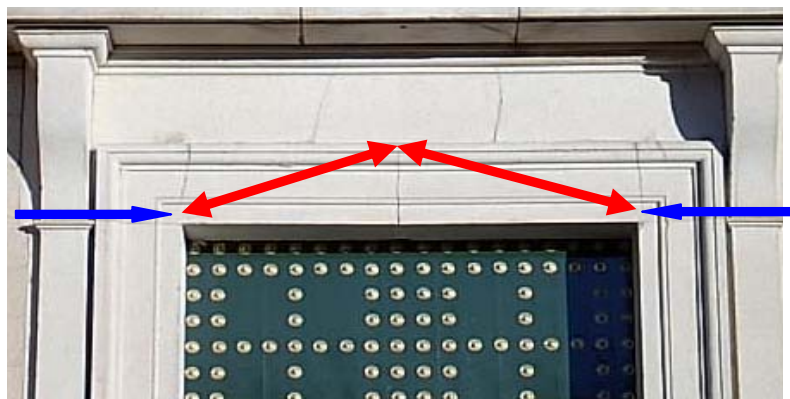
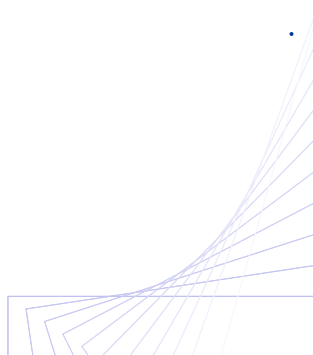


Figura 18. Esquema de bielas en equilibrio en el dintel-arco sobre la puerta central de la fachada oeste del monasterio de El Escorial.

Ante una construcción existente, el técnico debe proceder manteniendo como objetivos los siguientes:

- Identificar los elementos estructurales, es decir, los que son protagonistas del hecho resistente de la construcción. Esto puede ser considerado un paso del proceso más que un objetivo y, desde luego, así sucede con las estructuras “convencionales”. Sucede, sin embargo, que, sobre todo en las construcciones de fábrica, los elementos verdaderamente resistentes están ocultos, disfrazados bajo la piel de los ornatos y hasta disimulados por geometrías engañosas, que inducen a plantear erróneos esquemas resistentes. Baste pensar, a título de ejemplo, que las “sinceras” estructuras góticas, con nervios y plementos que parecen pregonar las direcciones de los esfuerzos resistentes internos, movilizan en la práctica patrones muy diferentes a los aparentes. Qué no decir de construcciones masivas como las barrocas o incluso las clásicas, en las que nada de lo anterior se manifiesta siquiera. Identificar los elementos resistentes es ya un importante paso de análisis de la estructura, desde el punto de vista conceptual.
- Identificar los diferentes modos de fallo posibles. Nuevamente, esto parece más una fase del trabajo técnico que un objetivo en sí mismo, pero es que no siempre resulta equiparable el funcionamiento de estas estructuras al de las de hormigón o acero al uso. Imaginar los modos de fallo (figura 14), en conjunción con la identificación previa de los elementos estructurales, ayudará a entender el funcionamiento de la construcción y a saber contra qué eventuales daños ha de quedar salvaguardada.
- Deducir el nivel de seguridad de la estructura —o de un determinado elemento estructural— a partir de su estudio en situaciones cercanas al agotamiento, atendiendo a los posibles modos de fallo, previamente identificados. Se comentará más adelante que esta cuantificación es en extremo compleja, por lo que no puede descartarse *a priori* que, en muchos casos, no será posible valorar el nivel de seguridad en términos convencionales. En este sentido, una

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios



- herramienta de excepcional ayuda la constituyen los teoremas del mínimo y del máximo de la plasticidad. En ocasiones sólo las pruebas de carga permitirán sancionar como válida una determinada estructura.
- Calibrar el comportamiento de la estructura en condiciones de servicio, a partir del nivel tensional y de fisuración de los diferentes elementos estructurales. Este objetivo puede parecer ocioso si ya se ha estimado el nivel de seguridad, pero puede resultar imprescindible para plantear la política de mantenimiento, o interpretar ciertos deterioros observables a la luz, por ejemplo, del comportamiento dinámico.
 - En casos concretos, el análisis estructural sirve de guía a la auscultación, optimizándola, pues permite detectar los puntos más sensibles. El proceso exige normalmente un proceso recíproco de alimentación modelo-auscultación.

El papel de los técnicos

La importancia social y profesional que se concede a la tarea de intervenir en el patrimonio construido es escasa, tanto en términos absolutos como relativos al interés mediático que despiertan las creaciones de la arquitectura de nueva planta. Prueba de ello es que son conocidos los nombres de los creadores —rodeados por eso de cierta aureola de divinidad—, pero son ignorados los nombres de los reparadores y mantenedores que, como médicos, velan por la salud y la vida de los edificios. Aunque la historia de esta “Medicina” está jalonada de éxitos (la intervención de Gaudí en la Catedral de Palma de Mallorca —la faceta restauradora del genial arquitecto es mucho menos conocida que la faceta creadora—, la doctrina y la praxis de Viollet-le-Duc, etc.) y de fracasos (no se citan), es de justicia poner de manifiesto el enorme interés intelectual y científico de una disciplina que, mucho más de lo que se cree, se sitúa en la frontera del conocimiento y en la vanguardia tecnológica.

No es casualidad que muchas grandes figuras creadoras, completas y humanistas, han participado en esta actividad. Muestra de ello han sido Chueca Goitia, Torroja, Menéndez Pidal, Fernández Casado. En tales casos, los grandes maestros han dado también una lección que otros, menos conocidos pero más especializados en estas cosas de lo ya construido, han exhibido una gran generosidad, desprendidos de afán de protagonismo a favor del edificio existente y de su continuidad.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

4. Actitudes ante el edificio existente. De la inspección al proyecto

Planteamiento filosófico

Ante el edificio existente el técnico ha de entablar un continuo toma y daca, de preguntas y respuestas⁴, de estado permanente de apertura al entendimiento y de sucesivos tanteos y de aproximaciones sucesivas, que los autores entienden como “diseño conceptual”, que no es el resultado de feliz inspiración sino de un tenaz esfuerzo de búsqueda del óptimo, es decir, del compromiso.

En sintonía con la reflexión de Ortega, el técnico tiene que entender el edificio y sus circunstancias, en pasado presente y futuro. A este respecto, es importante que el técnico mantenga y estimule la sensibilidad hacia lo construido, a lo que puede contribuir en gran medida la existencia (no siempre aplicable) de cartas de restauración que representan una interesante aproximación al deseable “código de conducta” hacia el *ethos* de lo construido. Asimismo, tanto en la fase de aproximación como en la posterior de desarrollo, es imprescindible mantener un diálogo multidisciplinar y abierto.

La inspección

Desde el punto de vista estructural, el técnico tiene que inspeccionar la estructura, entablar con ella ese ineludible diálogo a través del tiempo y del espacio que le permita conocer su pasado, entienda su presente y le ayude a augurar un buen futuro.

Para llevar a buen puerto esa relación con la construcción hace falta, en palabras del maestro Ramón del Cuvillo, “poder ver” (disponer de medios de acceso e inspección), “saber ver” (en alusión a la cualificación de los técnicos que inspeccionan) y, por último, “saber lo que se quiere ver” (preparar la inspección, entender el proyecto previsto y conocer la historia clínica de la estructura, naturalmente en pasos sucesivos).

Naturalmente, cabe plantear también el diálogo con entes más locuaces, como los proyectos antiguos, sus testimonios escritos, etc., tal y como se ha expuesto más arriba.

Tras la campaña de prospecciones y ensayos, así como de unos análisis estructurales o de durabilidad —pensado y dirigido todo ello, inexcusablemente, por personas expertas— se formula un diagnóstico que precise la causa o causas de los daños observados, y su afección al nivel de seguridad. Esta fase cierra lo que los médicos llaman de “analítica y diagnóstico”, en la medida en que se comprende el esquema resistente de la estructura y se efectúa el correspondiente estudio estructural en servicio y en agotamiento. Obligado, aunque menos frecuente, es hacer también aquí el estudio de durabilidad que permita pronosticar la vida útil que le resta a la estructura si no se interviene. La

⁴ Javier Rui-Wamba afirma que la respuesta de las construcciones es, con frecuencia, explícita, en forma de daños que “revelan el disgusto de las estructuras sienten ante la forma en que han sido tratadas”.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

experiencia demuestra que esta operación requiere el concurso multidisciplinar de especialistas que, bajo una dirección única, permita identificar todas las caras del problema de tal forma que la fase siguiente, la de la propuesta terapéutica, se oriente con las mejores garantías.

El planteamiento estructural

Entendido el esquema resistente del edificio, fruto de esa relación recíproca entre técnico y construcción, se debe sellar con aquél un pacto de respeto, de mínima intervención compatible con e fin perseguido, sin alterar un esquema estático que ha funcionado bien durante tanto tiempo y que no consentiría, sin disgusto, modificaciones en su aludido *ethos*. Esta solución de compromiso, válida también en otros ámbitos, deja en la caricatura dos situaciones extremas de las que debe huirse como de todo planteamiento radical:

- Eliminar el 100% de lo que hay (o prescindir de ello ignorándolo).
- No tocar lo que hay y respetarlo obstinadamente aun si no ofrece garantías suficientes o resulta prohibitivo.

Dentro de este planteamiento estructural está el análisis, con frecuencia especial, muy diferente del convencional.

Para empezar, las bases de cálculo pueden ser diferentes. En primer lugar, porque la magnitud de las acciones puede estar asociada a periodos de retorno mayores que los empleados en proyectos convencionales. Es el caso, por ejemplo, de la acción del viento sobre una catedral, en condiciones de vida útil y exposición especiales.

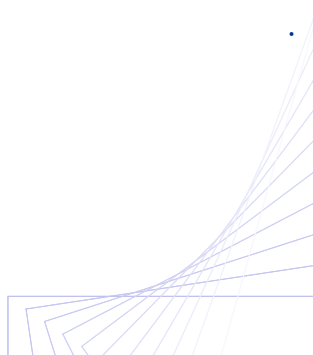
En cuanto al formato de seguridad y las herramientas de análisis, los autores mantienen la opinión de que no es posible consagrar un determinado marco o una determinada herramienta como única, sino que han de ajustarse al nivel de incertidumbre que rodea la estructura, la cantidad de información disponible y la propia experiencia. Valga como advertencia la frase —mordaz y demoledora— atribuida al presidente de la rama escocesa de la Institución Británica de Ingenieros Estructurales: “La ingeniería estructural es el arte de modelizar materiales que no comprendemos del todo, en formas que no podemos analizar de un modo preciso, para soportar esfuerzos que no podemos evaluar adecuadamente, de manera que el público en general no tenga razón alguna para sospechar de la amplitud de nuestra ignorancia.”

Se pueden clasificar los métodos de análisis de acuerdo con tres niveles o alcances:

Nivel 0. Un mero análisis de los ratios geométricos relevantes (relación luz/flecha, luz/canto, esbeltez de soportes, etc.), si no hay daños manifiestos, puede ser suficiente para validar una estructura o una parte de ella, sin necesidad de mayores complicaciones.

Nivel 1. Se sustenta en la comprobación de que se satisfacen las condiciones de equilibrio, admitiendo como válidas ciertas hipótesis del

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios



análisis límite de estructuras. Ejemplo de este conjunto de herramientas son la estática gráfica o los métodos basados en el principio de los trabajos virtuales o teoremas de reciprocidad. Se aceptan, de las infinitas soluciones, las que verifican el teorema del límite inferior.

Nivel 2. Constituyen un paso más: al cumplimiento de las condiciones de equilibrio se les añade la exigencia de respetar las ecuaciones constitutivas de los materiales (lineales o no lineales), aunque no se impongan condiciones de compatibilidad. Exigen la definición de ciertas características de los materiales, por lo que exigen más datos que los del nivel anterior. Así, se plantean como herramientas de comprobación, cumplido el equilibrio, diagramas de interacción en agotamiento. De las infinitas soluciones posibles *a priori*, se pueden tomar las acotan el problema (teoremas del mínimo y del máximo de la teoría de la plasticidad).

Nivel 3. Exigen el cumplimiento de los tres grupos de ecuaciones clásicos: equilibrio, compatibilidad y constitutivas de los materiales, lo que asegura, en teoría, una única solución, lo que representa una falacia puesto que eso depende del tipo de modelo que se utilice (MEF y el caso particular de las barras, de si es lineal o no lineal, de si tiene en cuenta los fenómenos diferidos o el 2º orden, etc.). Evidentemente, requieren de una ingente y fiable información que el técnico debe gestionar de manera adecuada.

Los anteproyectos y proyectos de intervención

En general, se trata de trabajos relativamente sencillos *a priori* —si se comparan con grandes proyectos de obra nueva—. El éxito de los proyectos pasa por la calidad del diagnóstico (inspección especial) y por la inteligencia con que se planteen las posibles soluciones. Como en todo tipo de proyecto, requieren asimismo de un profundo conocimiento de las condiciones de contorno (también la eventual necesidad de mantener ciertas condiciones de uso), de grandes dosis de buen juicio, en un ámbito en el que la ausencia de normativa deja el campo mucho más abierto que en la obra nueva y, finalmente, de la idoneidad de la ejecución (medios disponibles, materiales adecuados, etc.). El valor histórico y artístico de la construcción (declarado oficialmente o no) obliga a mantener una posición especial a la que no es ajena la estructura, protagonista destacada de dicha belleza (como expresaban los de la Bauhaus).

Asistencia técnica durante la intervención

Asociadas estas labores con frecuencia a tratamientos meramente cosméticos, se ha infravalorado la importancia del control de estas operaciones. Debe tenerse presente que, con mucha frecuencia, estas actuaciones son en sí mismas un prototipo, que no hay dos iguales, que no se han tenido todos los datos y que, durante la ejecución, pueden presentarse sorpresas a las que debe darse respuesta. Esta fase es equiparable a la de la aplicación de la terapia propuesta en el proyecto, que requiere, naturalmente, de cirujanos competentes. Pero es también equiparable a la fase de “post-operatorio” y convalecencia, cuando es

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

preciso seguir la evolución del paciente con la oportuna auscultación y el puntual seguimiento de la bondad del diagnóstico, de la medida terapéutica elegida y de cómo se ejecutó ésta.

5. Algunas experiencias

5.1. Rehabilitación estructural de un edificio en la c/ Padre Lojendio de Bilbao

El edificio ubicado en la c/ Padre Lojendio, de Bilbao es una interesante construcción de 1925. Su configuración estructural es la de muros de carga, paralelos a la fachada principal, y dos crujeías de luces 11,5 y 10,5 m respectivamente.

Durante la construcción se valoró la posibilidad de modificar la propuesta inicial del proyecto, redactado con muchos menos datos de los que, naturalmente, es posible obtener durante las fases de ejecución. Así, se estudió cuidadosamente la posibilidad de utilizar la magnífica losa nervada que constituyen los paños de forjado (figura 19).

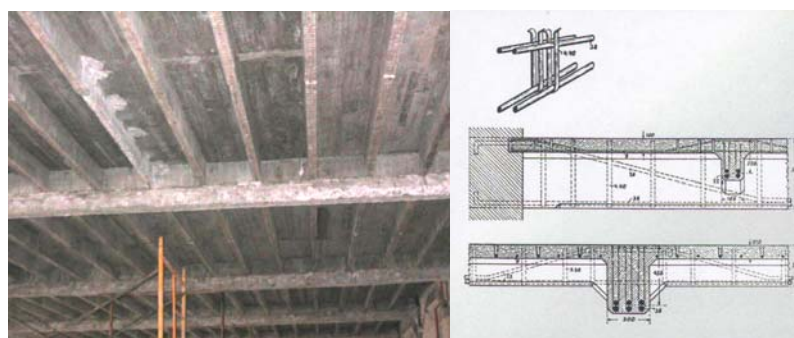


Figura 19. Losa nervada que responde a la configuración típica de la patente Hennebique (derecha). Las jácenas se habían dimensionado sólo con armadura traccionada, incluso para un momento mayor que el límite. Por esa razón, con armadura en servicio trabajando a una tensión reducida, no se manifestaba fisuración apreciable. Sin embargo, sí se observaba una flecha diferida relativamente importante.

Tras diseñar una campaña de reconocimiento general de la estructura (geometría y armaduras), se acometió un estudio estructural que permitió ahorrar una gran parte de los refuerzos estructurales inicialmente previstos al tiempo que se pudo identificar qué elementos necesitaban de refuerzo. Es interesante añadir que tales refuerzos no consistieron en añadir armadura, sino en añadir hormigón, debido a que las vigas estaban sobreamadas (figura 20), con momentos mayores que el límite, debido a que tal circunstancia no era conocida en el momento de redactar el proyecto (1923). En este caso, resulta totalmente inútil un pretendido refuerzo por la cara inferior.

La actuación consistió en reforzar los elementos infradimensionados y en asegurar una adecuada protección contra la corrosión. El refuerzo estructural se realizó en la cara superior, dotando a las secciones de mayor canto. En casos como éste, el incremento de capacidad resistente

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

por aumentar el canto es prácticamente neto, puesto que el relleno previsto en el proyecto igualmente pesaba y no contribuía estructuralmente.



Figura 20. Catas practicadas en las jácenas (caras inferior y superior) y en las viguetas in situ.

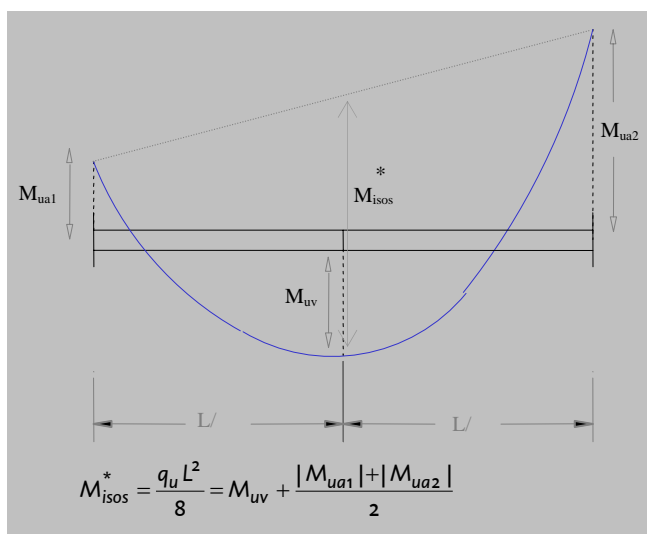


Figura 21. Socorrida expresión que permite, aceptando ductilidad suficiente, contar con la redistribución de esfuerzos en la evaluación de elementos hiperestáticos.

5.2. Rehabilitación y conversión en Casa de Cultura del antiguo Convento de S. Francisco en Mondragón

En noviembre de 2002, iniciada ya la obra de rehabilitación según un proyecto previo, se detectó la necesidad de alterar sustancialmente las previsiones iniciales dada, por una parte, la configuración de la estructura de muros de fábrica y pilastras de ladrillo sobre zócalo de piedra y, por otra parte, la necesidad de transmitir las nuevas cargas, notablemente mayores, a un estrato competente, dadas las deficiencias de la cimentación existente.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

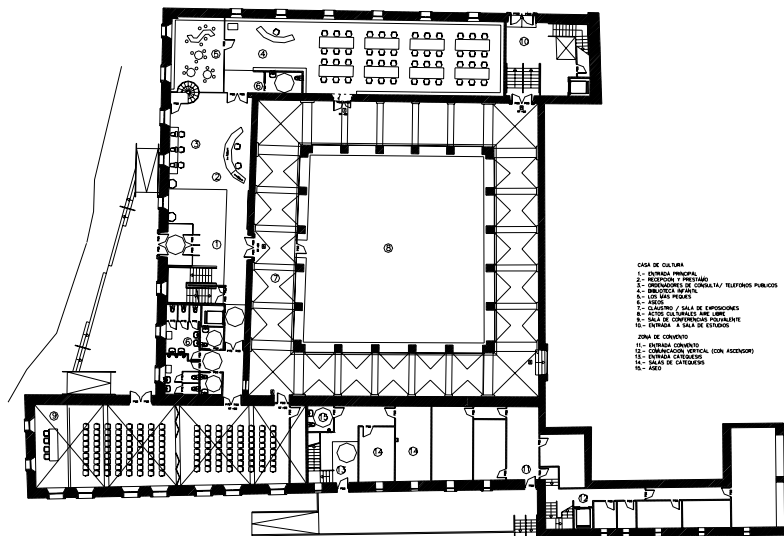


Figura 22. En la parte superior, planta del edificio y su claustro. En la figura inferior, vista del edificio durante las obras.

Para todo ello se planteó como mejor solución el recalce de las cimentaciones mediante micropilotes y encepados desde los cuales se alzaron los nuevos muros.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

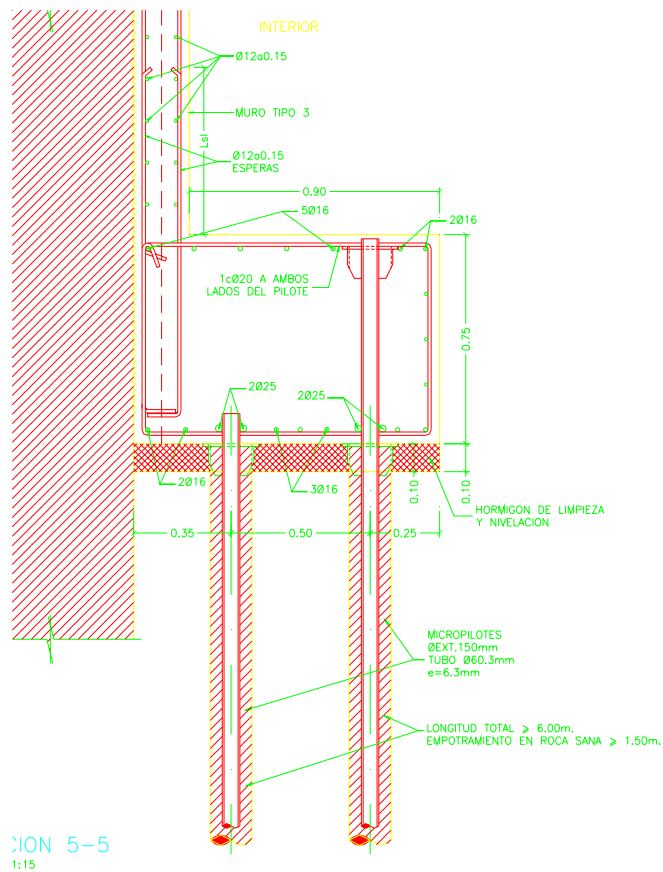


Figura 23. Recalce de la cimentación de los muros mediante un encepado corrido con parejas de pilotes y un muro de hormigón adosado.

El trasdós de las bóvedas se vació cuidadosamente y se procedió al cimbrado de los elementos más comprometidos, a fin de reconstruir posteriormente los peores elementos (figura 24).

Actitudes y experiencias en la
intervención estructural de
edificios



Figura 24. Acondicionamiento de senos de bóvedas y arcos formeros en la zona del claustro.

Especial atención mereció el refuerzo de los pilares de ladrillo, de una capacidad portante que en absoluto habría admitido el fuerte incremento de cargas previstas para el nuevo uso. En realidad, no se reforzaron los pilares, sino que se enhebraron, desde la parte superior, micropilotes perforados ejecutados sobre plataforma con gran precisión. Ello permitió, conectar a los micropilotes la nueva estructura horizontal, formada por perfilaría metálica y chapa grecada colaborante.

Actitudes y experiencias en la
intervención estructural de
edificios



Figura 25. Ejecución de los micropilotes desde plataformas construidas al efecto. Enlace de los perfiles de estructura horizontal a los micropilotes.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

5.3. Rehabilitación del Palacio de la Diputación Foral de Vizcaya

En el año 2000, durante las labores de rehabilitación del Palacio de la Diputación, se evidenció el problema, no detectado durante el proyecto porque se trataba de un vicio oculto, de dinteles partidos, cornisas deformadas y pináculos desplomados que presentaba la última planta del noble edificio.



Figura 26. Fachada principal y detalle parcial de unos perfiles que, a modo de dinteles-cargadero, dispuso con la mejor intención el arquitecto autor del proyecto en 1899. Un siglo después, la corrosión de los perfiles convirtió a éstos en un cáncer que amenazaba con la integridad de la parte alta del edificio (ver también las figuras 9 y 10).

Tras una inspección detenida de la estructura, de casuística diversa, se llegó a la conclusión de que la herrumbre generada por los perfiles metálicos dispuestos como dinteles-cargadero había producido la expansión que, finalmente, había inducido la rotura de las piezas de piedra.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

La solución, audaz, consistió en eliminar los perfiles metálicos y aprovechar las posibilidades resistentes de los dinteles de piedra (que existen y funcionan adecuadamente en las plantas inferiores) y mantener su esquema resistente de arco plano, como se indicó en la figura 18. Así, como sustitutivo de la perfilería, se introdujeron unos dinteles de hormigón que, adecuadamente confinados en sus extremos, funcionaban como arcos planos. La armadura (inoxidable, figura 27) se dispuso con el único propósito de controlar la fisuración. Con el fin de asegurar el proceso constructivo, se planteó una ejecución por bataches, lo que, en la práctica, equivalía a que el dintel se ejecutase por tramos alternados, sin armadura de conexión entre ellos, lo que forzosamente exigiría, al descimbrar, el funcionamiento como de arco plano.



Figura 27. Dintel de hormigón junto a tramo metálico previo a su extirpación.

5.4. Estudio de las pilas y arbotantes de la Catedral de Palma de Mallorca

Las pilas de la Catedral de Palma de Mallorca son las más esbeltas del gótico mundial y presentaban (y así seguirá sucediendo) una incurvación que no dejó indiferente al equipo técnico. Tales incurvaciones, junto a fisuras verticales (con testigos desde 1965), no ofrecían la impresión de estar del lado de la seguridad.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios



Figura 28. Interior de la Catedral de Palma de Mallorca.

Tras unos tanteos previos, se determinó la necesidad ineludible de acometer una campaña de reconocimiento geométrico y de caracterización mecánica de las fábricas (figuras 7 y 29). Con dicha información se alimentó un modelo de estudio de pilas esbeltas, ya consagrado para piezas de hormigón, lo que pone de manifiesto la extraordinaria capacidad de respuesta que tiene el técnico cuando se trasvasan, juiciosamente, los conceptos de una disciplina a otra.

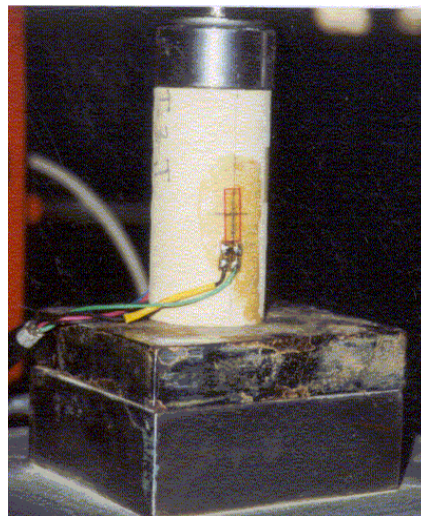


Figura 29. Ensayo de caracterización de la piedra de las probetas extraídas (cortesía de INTEMAC).

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

Se ha utilizado la expresión de Ohler, recogida y analizada en [5].

$$f = 0,75 \left[f_m + \frac{af_b - f_m}{1 + \frac{b\alpha f_b}{mf_{b,t}}} \right]$$

El valor utilizado fue $f = 21 \text{ N/mm}^2$. Un aspecto de gran importancia, ya mencionado, es el de la profundidad de los sillares de las pilas y el de su labra. En efecto, una labra deficiente de las tablas (caras horizontales de los sillares) puede propiciar la concentración de tensiones en los bordes y roturas por descantillado en los mismos. La finalidad de algunos de los testigos extraídos, precisamente según el plano horizontal del tendel, era la de conocer tanto la profundidad de los testigos como la configuración de la junta. La figura 30 da fe de la excelente labra y paralelismo de los sillares, con junta de cal (muy homogénea), uniforme, de unos 8 mm.



Figura 30. Aspecto de una de las muestras extraídas por la junta (8 mm) entre sillares de pila.

Se utilizó un procedimiento simplificado de seguridad “global”, puesto que ha parecido el más adecuado ante el comportamiento claramente no lineal que exhibe la estructura—las pilas en particular—y un eventual colapso por inestabilidad. Así, la seguridad se cuantifica con un único coeficiente que describe lo lejos que se halla la situación “real” de la situación de colapso para los modos de fallo previstos (pandeo o agotamiento). Dicho de otra manera, el coeficiente expresa el número de veces que el esfuerzo que produciría el fallo es mayor que el esfuerzo “real” calculado. Se adopta un coeficiente expresado en términos de esfuerzos y no referido a las cargas exteriores ya que se considera que, al ser las principales cargas las debidas al peso propio, el axil que solicita a las pilas no tiene posibilidad física de aumentar apreciablemente sino que está acotado por el peso de los elementos soportados por las pilas. Sin embargo, la excentricidad de la carga sí podría aumentar por causas accidentales conduciendo a un colapso por inestabilidad.

Por tanto, el coeficiente de seguridad se ha definido como el cociente entre la excentricidad límite de colapso de la pila, obtenida por el procedimiento que se describe más adelante, y la excentricidad de primer orden obtenida en el cálculo de la sección transversal del

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

perpiano. No obstante, se hace notar que el modo de colapso calculado se refiere al pandeo de una pila considerada como elemento aislado y no al colapso general a nivel de estructura. Con las hipótesis de cálculo efectuadas, los resultados así obtenidos (en términos de coeficiente de seguridad) serán, previsiblemente, conservadores en términos de coeficientes de seguridad.

En el análisis estructural, planteado con una herramienta de tercer nivel (método de los elementos finitos, con control de las tracciones resultantes).

Durante la fase de análisis se detectó (entre otras cosas estudiadas en un análisis de sensibilidad) la necesidad imperiosa de simular de forma razonable, de acuerdo con la información histórica disponible, el proceso constructivo seguido.

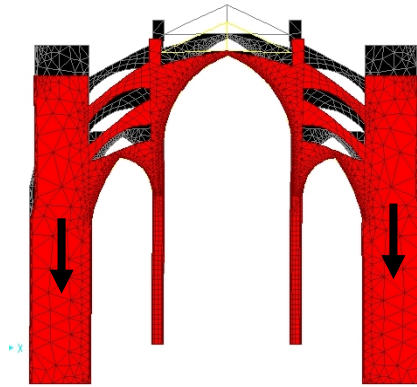


Figura 31. Efecto ficticio del peso propio de los botareles.

En efecto, calcular la sección transversal de la catedral como si se hubiera construido tumbada para luego ser izada íntegra hace entrar en juego el peso enorme de los botareles. De alguna manera este peso excéntrico tira de la sección hacia los extremos produciendo un efecto de *cuelgue* como se ve en la figura 30. Las pilas reaccionarían así como un punto duro, sobrecargándose. En realidad, si los botareles se construyen antes de que la sección trabaje en conjunto, su peso no afecta a la estructura sino sólo a sí mismos. De lo contrario, los elementos menos rígidos que conectan los botareles con las bóvedas y las pilas (arbotantes y bóvedas bajas) estarían solicitados (en el modelo, no en la realidad) por esfuerzos inadmisibles. La secuencia más lógica es la de la figura 32.

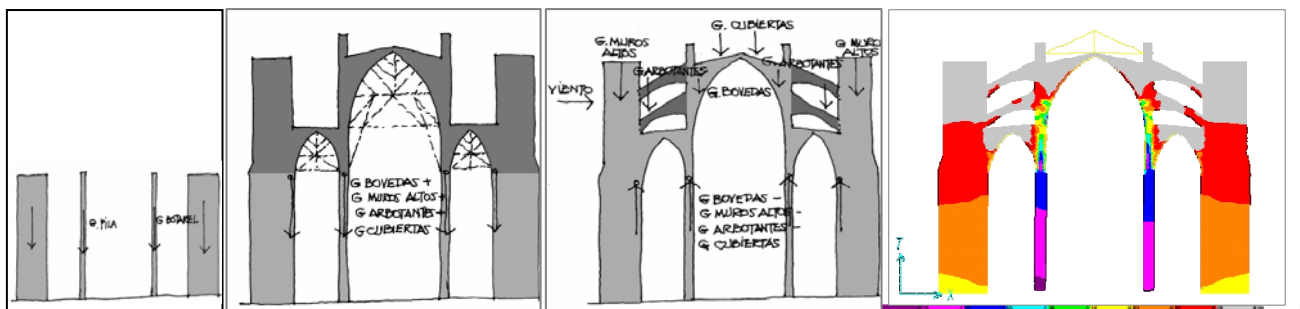


Figura 32. Proceso constructivo simulado, con resultados lógicos.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

Efectuado el análisis anterior, se dedujeron los esfuerzos solicitantes con los que se pudieron construir las curvas como las de la figura 33 [6].

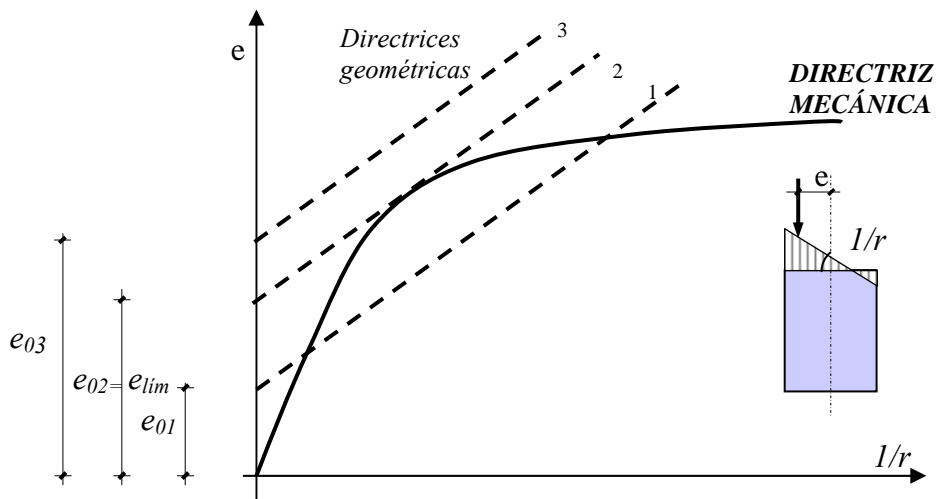


Figura 33. Directrices mecánica y geométrica para deducir el valor de la excentricidad máxima que provocaría el colapso por inestabilidad de las pilas.

$$\text{Seguridad} \approx \frac{e_{\text{lim}}}{e_e}$$

Siendo e_e , simplifadamente, la excentricidad inicial deducida del análisis en primer orden. El resultado arrojó valores de la “seguridad” en torno a 6.

Para el estudio de los arbotantes (figura 34) se siguió un procedimiento de análisis con una herramienta de segundo nivel: análisis límite con control de la interacción axil-momento-flexión. Dicho análisis permitió deducir que el nivel de seguridad está más ajustado y que es preciso controlar las deformaciones del conjunto, dado que la seguridad depende de la inmovilidad de los extremos.

Actitudes y experiencias en la intervención estructural de edificios

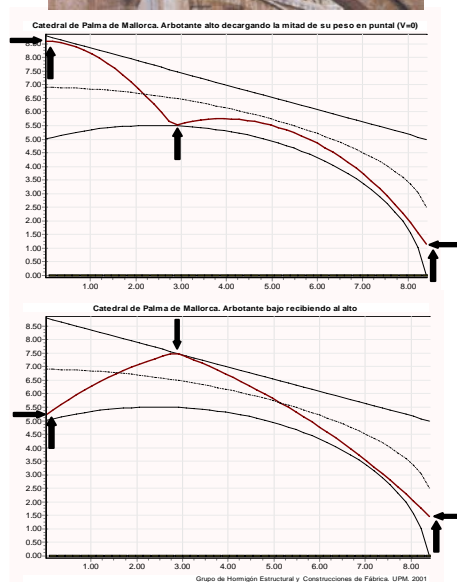


Figura 34. Estudio de los arbotantes de la Catedral de Palma (2000).

6. Referencias

1. PIEPER, K. *Sicherung historischer Bauwerke*. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn. Berlin-München, 1983.
2. MOLA, F. *Intervención en la Basílica de San Marcos de Venecia*. Madrid. IABSE-Fundación COAM. Conferencia pronunciada el 13 de noviembre de 2000.
3. RÍOS, D. de los. *La Catedral de León*. Madrid, 1887.
4. GONZÁLEZ, A. *Intervenciones en el Patrimonio Arquitectónico*. Diputación de Barcelona. Barcelona 2000.
5. MARTÍNEZ, JL; MARTÍN-CARO, JA, LEÓN, J. Martínez, J.L.; Martín-Caro, J.A. León, J. *Caracterización del comportamiento mecánico de la obra de fábrica*. Monografías sobre construcciones históricas. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
6. CORRES, H. *El método de las curvaturas de referencia*. Tesis Doctoral. ETSICCP. Madrid, 1980.