

OBRAS DE FÁBRICA¹. SOSTENIBILIDAD E INGENIERÍA

JAVIER LEÓN GONZÁLEZ

FHECOR Ingenieros Consultores. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPM

HUGO CORRES PEIRETTI

FHECOR Ingenieros Consultores. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPM

SERGIO ESPEJO NIÑO

ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPM

RESUMEN

Hace ya muchos años que dejaron de construirse obras de ingeniería cuyo material estructural es la sillería, el ladrillo o la mampostería (y hasta el hormigón en masa, que cabría incluir en este grupo), es decir, lo que genéricamente se entiende por “fábrica”. Sin embargo, el número de construcciones que forman parte del patrimonio construido es enorme. Baste decir, sin citar el vasto patrimonio arquitectónico de carácter monumental, que, en España, el número de puentes de la red ferroviaria que son de fábrica ronda el 40% y que, en carreteras, dicho porcentaje se sitúa en torno al 30%. Se trata de construcciones de ingeniería o de arquitectura —estructuras, en definitiva— que han evidenciado una muy larga vida útil (aún no concluida) y, por consiguiente, un coste total muy bajo, lo que las sitúa en el primer lugar de las estructuras sostenibles.

Sucede que, con frecuencia creciente, los técnicos responsables de este patrimonio se enfrentan a la necesidad de atender su reparación, refuerzo o ensanche. Ante ese problema, los técnicos adoptan, en caricatura, dos actitudes: prescindir de la estructura existente, demoliéndola o confiriéndola un papel secundario de fachada, o mantener a ultranza su configuración primitiva, impidiendo su ampliación funcional. El trasvase de conocimientos de unas disciplinas a otras, tan fecundo en otras ramas del saber, debe conducir —lo está haciendo ya, de hecho— a un mejor aprovechamiento y simbiosis de las etopeyas de los materiales antiguos y nuevos, lo que da lugar, casi siempre, a la solución más económica, sostenible y satisfactoria.

En esta ponencia se presentan las ideas fundamentales de esta actitud, plena de contenido técnico e ingenieril, a la que tan buen futuro aguarda, en una sociedad que valora cada vez más el patrimonio construido, tanto de edificios como de obras de ingeniería, y que tiene reflejos en la formación de los técnicos y en el contenido tecnológico de las empresas.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando las primeras sociedades humanas decidieron convertir en sedentaria su anterior condición nómada, aparecieron las necesidades y servidumbres que rodean a los grupos organizados. Una primera necesidad que sintieron los humanos civilizados fue la de cubrir espacios de arquitectura planificada para guarecerse, almacenar víveres, trabajar, orar, etc. Simultáneamente surgió la necesidad de abrir vías de comunicación para pasar en condiciones de seguridad a la otra ribera de un río, para salvar un tajo. La necesidad se convirtió pronto en un reto (figura 1). Un entorno hostil, de proporciones muy superiores a las del ser humano hizo

¹ Según el DRAE, “Fábrica: Construcción o parte de ella hecha con piedra o ladrillo y argamasa”.

especialmente difícil —de ahí el reto— establecer una vía de comunicación estable, superviviente a dicho entorno y a la generación que lo construyó. Precisamente la vocación de pervivencia y la idea del ser humano de que su obra le habría de sobrevivir son distintivos de las comunidades que marcan la frontera entre la Prehistoria y la Historia. Los monumentos megalíticos, aunque convencionalmente prehistóricos, dan cuenta de un sentido estructural verdaderamente arraigado en el ser humano y constituyen una forma de ‘escritura’ que a los autores les parece que justifica la inclusión de aquellos constructores en la más noble condición de “históricos” que de “prehistóricos”.

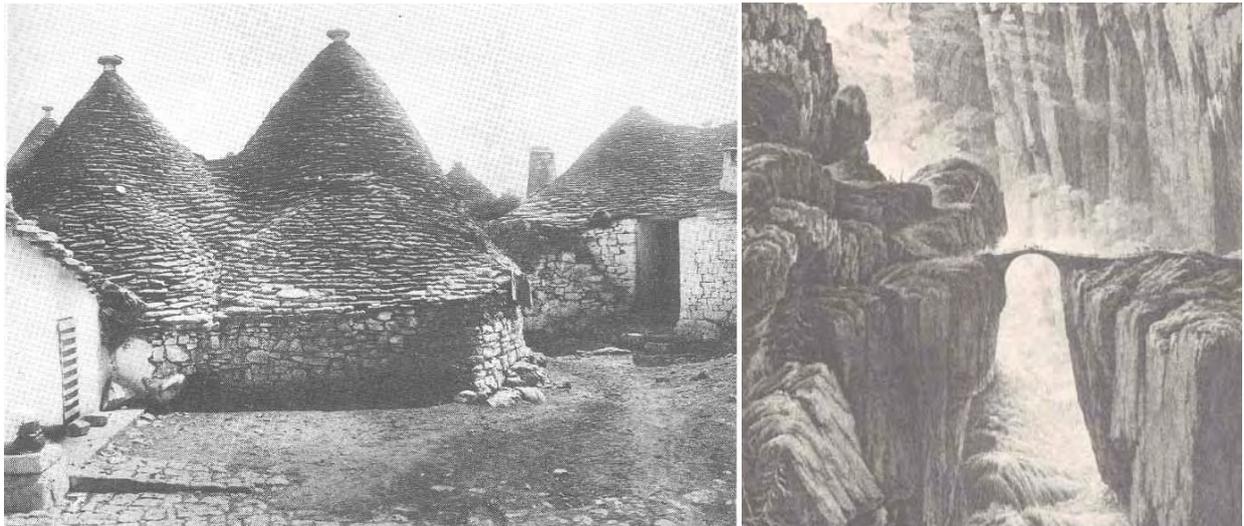


Figura 1. Trulli en Apulia (Italia). Construcciones cupuliformes en piedra a base de hiladas en voladizo. Puente del Diablo, según un grabado romántico.

Para satisfacer las necesidades constructivas de las primitivas sociedades, los constructores debieron hacer uso de los materiales que la naturaleza les brindaba, junto a grandes dosis de ingenio, buen juicio y valentía, cualidades que, como es sabido, resultan a menudo contrapuestas. De todos esos materiales, los que importan en este escrito son los pétreos, asociados precisamente al aspecto que se quiere subrayar aquí: la larga vida y, consiguientemente, la “sostenibilidad”, nunca desprovista de ingeniería para concebir, para construir y para no mantener, porque lo que hacían debía de ser perdurable.

El *leitmotiv* de este artículo es precisamente reivindicar la validez de las construcciones existentes de fábrica para seguir prestando su función, y aún sacarles más partido. Estas construcciones han demostrado, de largo, ser las más durables de todas las que los seres humanos han erigido, incluidas las metálicas y las de hormigón, a pesar de los notables progresos que, para estas últimas, se han dado en los últimos años. En su inspección, análisis y reutilización tienen los ingenieros un gran papel que jugar, a pesar de que la fábrica se haya considerado hasta hoy una disciplina perdida.

La figura 2 muestra un puente de fábrica en un entorno urbano, clásico, repleto de otras obras de fábrica que son edificios e iglesias, paisaje habitual en Europa. En todo caso, para los ciudadanos lo importante es que los puentes sirven para comunicar, con toda la carga semántica y poética, pero no menos real, que comporta la palabra puente y su función. Añádase que el porcentaje de puentes de fábrica con que cuenta España (carretera y ferrocarril) con relación al total representa,

en promedio, entre el 30 y el 40%, valor que se sitúa en el entorno del valor medio europeo², representando los puentes aproximadamente el 2 ó 3% de la longitud de la red de que forman parte (ferroviaria o de carretera), con un valor patrimonial (económico) que representa el 30% del total de esa red.



Figura 2. Ponte a la Trinitá. Visión pictórica de José Muñoz Bernardo.

Estas nobles estructuras, en servicio desde hace siglos, pueden dar aún mucho juego, en sintonía con “lo sostenible”, tan justamente de moda en estos tiempos. Sin embargo, para emitir, en su caso, pronunciamiento favorable al aprovechamiento del puente —que es casi siempre la mejor solución—, el ingeniero tiene que decidir qué y cómo hacer para ensancharlo, reforzarlo, repararlo, etc. Generalmente, toda actuación que implique mejorar la capacidad portante pasa por considerar la necesidad de reforzar la cimentación. En otras ocasiones, es la sospecha de que la socavación haya podido debilitar la capacidad del puente, o lo pueda hacer en el futuro, la que lleva al ingeniero a la necesidad de pronunciarse acerca de la cimentación. Además, resulta que la cimentación es el verdadero talón de Aquiles de estas estructuras, habitualmente “sobradas” de capacidad resistente, dando lugar con frecuencia (por socavación) a fallos frágiles, imprevistos, de graves consecuencias. Añádase a este respecto que, desde 2003, las actuaciones en las cimentaciones de los puentes de fábrica suponen aproximadamente el 50% del importe de las obras de rehabilitación en esta clase de puentes (según datos del Ministerio de Fomento y del ADIF). Además, en torno a un 50% de las obras de reparación en puentes de fábrica están motivadas patologías en sus cimentaciones, según las mismas fuentes.

En el ámbito de la edificación, civil o religiosa, no cabe duda alguna de la importancia económica, social, cultural, política, religiosa, etc. que tienen las obras de fábrica, que presentan una casuística aún más compleja que la de los puentes por la mezcla lógica de épocas, técnicas, materiales y criterios de intervención. En ese ámbito la participación de los ingenieros ha sido tradicionalmente menor, dado que se trata de una parcela habitualmente cubierta por los arquitectos. Sin embargo, se abren para los ingenieros ingentes posibilidades técnicas (quizás también económicas) de actuación en ese ámbito.

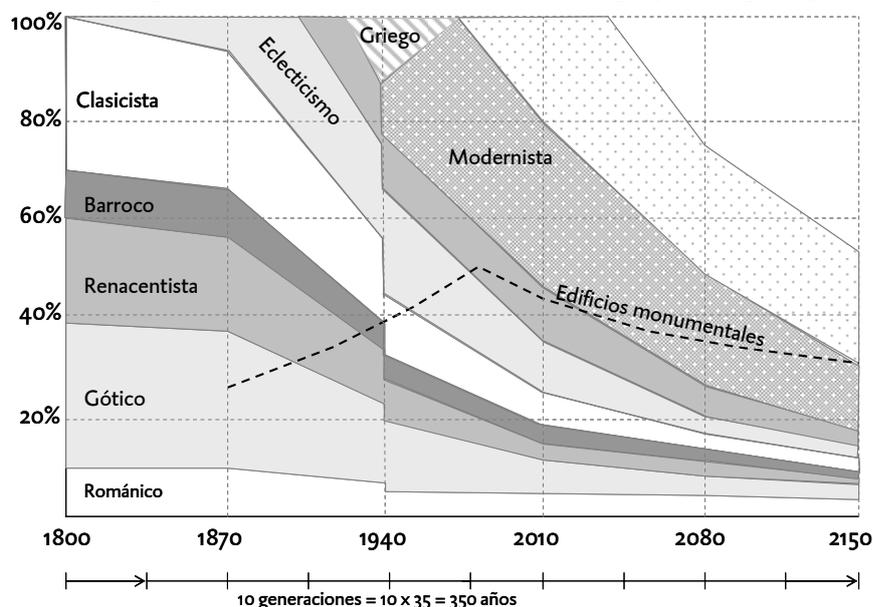
No se van a descubrir aquí, desde luego, los valores que el patrimonio construido —arquitectónico y de obras civiles— representa para la sociedad, como recoge Antoni González de manera lúcida y amena en [1]. Tampoco se pretende aquí analizar el elenco de estrategias de intervención que, con todos los enfoques —artísticos, urbanísticos, sociales, económicos, políticos, etc.— pueden seguirse a la hora de gestionar ese patrimonio. Los autores se conforman con aportar su visión de ingenieros, con la experiencia adquirida hasta el momento de escribir

² Resultados del programa BRIME (BRIdge Management in Europe), desarrollado hasta 2002 en el seno del 4º Programa Marco de Investigación patrocinado por la DG VII de la Comisión Europea.

esto, a una actividad en la que se hace patente la necesidad de entender el comportamiento de estas estructuras y sus mecanismos de deterioro como mejor forma de asegurar un mantenimiento sostenible. Todo ello con la actitud consciente y asumida de entregar a las generaciones venideras tan valioso legado, de forma que sean ellas, mejor preparadas, las que vayan completando la apasionante tarea de entender y mantener esas estructuras, en un contexto social que, como se viene detectando, será más exigente con la conservación del patrimonio construido.

Uno de los pioneros en el análisis de construcciones existentes fue Klaus Pieper [2]. Empieza este autor por decir que el deterioro progresivo y la destrucción son algo inevitable, como sucede con la vida del propio ser humano. Interesa también de Pieper la visión de cómo el patrimonio arquitectónico y de puentes 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 3). Esos aspectos formales y materiales también atañen a la estructura que da soporte a los edificios.

Lo anterior pone de manifiesto la creciente complejidad tipológica, de edades y avatares que



rodean a las construcciones, lo que se traduce en una gran complejidad de tratamiento del patrimonio construido, puesto que resulta imposible en la práctica configurar unos protocolos de intervención suficientemente uniformes y aplicables con un mínimo de generalidad.

Figura 3. 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.

A lo anterior se une una particularidad circunstancial que afecta muy especialmente a las estructuras de fábrica (puentes o edificios): el desconocimiento, la falta de personal técnico cualificado (desde ingenieros hasta mano de obra especializada). En efecto, hace ya muchas décadas que dejaron de transmitirse los conocimientos sobre obras de fábrica, sencillamente porque dejaron de construirse. En una sociedad mucho más preocupada por erigir nuevas construcciones que por rehabilitar las existentes, como es lógico porque esas eran realmente las demandas del momento, el conocimiento y el oficio relacionado con la construcción de este tipo de obras se perdió. Queda información en forma de tratados de construcción, algunas maravillosas memorias y magníficos planos (figura 4), pero incluso eso es insuficiente porque los retos de hoy son otros: mecanismos de deterioro (durabilidad, también en las fábricas), formatos de seguridad, técnicas de inspección y de reparación o refuerzo, etc.



Figura 4. Construcción de puentes en el s. XIX. Una tradición constructiva perdida. A la izquierda, construcción de un puente sobre el río Tera (Zamora), foto de Laurent, y construcción del Puente de los Franceses (Madrid).

Lo anterior justifica toda una línea de trabajo abierta para la participación de los ingenieros desde la administración responsable hasta los consultores, pasando por la universidad, los laboratorios, los constructores especializados, los suministradores de tecnología de inspección, ... Un reto que, como se ha dicho, sitúa a los técnicos relacionados con la obra de fábrica en la frontera del conocimiento y que exige una actitud abierta, un continuo estudio. En palabras de Poul Beckman, ante las construcciones existentes el técnico *must have a couple of open eyes and an open mind*.

2. MATERIALES

Se entiende por fábrica al material compuesto, no homogéneo e isótropo, por tres componentes esenciales: las piezas, el mortero y la interfaz, los cuales, dadas sus propiedades particulares y el comportamiento en conjunto, han permitido proyectar y construir estructuras desde épocas remotas hasta la actualidad. Una obra de fábrica es cualquier obra hecha con este tipo de material.

Decir que la fábrica es un material sostenible es casi una obviedad que conviene recordar: sus materiales constitutivos (piedra, ladrillo, grava, arena, ligante) son los que arrojan el ratio energía de producción (o coste) / tiempo de vida útil más bajo de todos los empleados en la construcción. En efecto, la madera es el material más natural de todos y que menos energía inicial requiere para su transformación en material de construcción, pero tiene un recorrido temporal más reducido que las fábricas, aunque suele convivir con ellas y en algunos casos sobrevive a éstas, como es el caso de las cimentaciones pilotadas antiguas. El acero requiere de cuantiosas inversiones iniciales y su durabilidad depende de un cuidadoso mantenimiento que, por haberse llevado a cabo y por haberse asumido como necesario, ha llegado a competir con su heredero cronológico que es el hormigón estructural, aliado con el acero (barras) y sujeto a unos procesos de deterioro que no se conocían cuando irrumpió en el mercado a finales del s. XIX, y que sólo recientemente se han empezado a conocer y combatir (Instrucción EHE, por ejemplo). Las fábricas, que acuden a materias primas que requieren un reducido nivel de transformación, se aprovechan de las formidables capacidades de durabilidad que ofrecen la piedra o el ladrillo de buena calidad. Además, su configuración masiva, de nivel tensional cómodo, le otorga unas cualidades robustas, de enorme reserva frente al inexorable desgaste.

Las piezas

La geometría y las propiedades mecánicas dependen, fundamentalmente de la naturaleza de la piedra o ladrillos. Los tipos de piedra usados más frecuentemente son granitos, calizas, areniscas

y en menor grado mármoles. Los ladrillos se elaboran generalmente con arcilla cocida, silicatos, morteros, hormigón, etc. En la figura 5 se recogen las denominaciones y proporciones geométricas habituales.

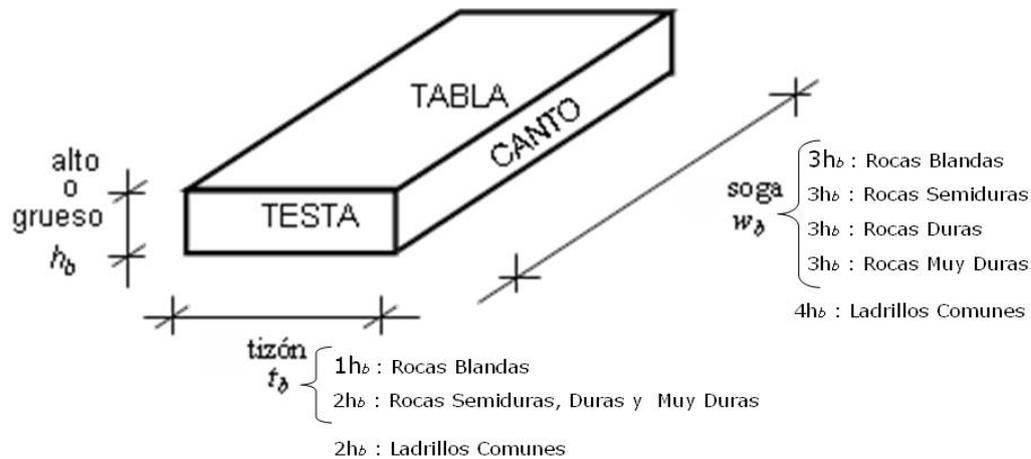


Figura 5. Nomenclatura para las dimensiones y las caras de la pieza. Se incluyen también algunas relaciones geométricas [4].

El peso específico de la piedra se sitúa entre 19 y 28 kN/m³ y, para ladrillos de buena calidad, entre 14 y 23 kN/m³. La tabla 1 muestra un resumen de los valores típicos de resistencia mecánica a compresión de las piezas.

Tabla 1. Resistencias típicas de la roca a compresión (valores mínimos – medios – máximos en probetas desecadas, según I. Baker) y de la fábrica aparejada (tercera columna), típicamente un 40% de la de la roca. Las columnas 4ª a 5ª se corresponden con los tipos de ladrillo, valores de la resistencia de sus piezas y de la fábrica aparejada de ladrillo (típicamente un 20% de la de las piezas), respectivamente.

Tipo de piedra	f_b [MPa]	f [MPa]	Tipo de ladrillo	f_b [MPa]	f [MPa]
Granito	14 – 134 – 191	5 – 53 – 76	Blando	4 – 8	0,8 – 1,6
Caliza	25 – 65 – 166	10 – 26 – 66	Medio	8 – 15	1,6 – 3,0
Arenisca	30 – 64 – 105	12 – 25 – 42	Duro	15 – 30	3 – 6
Mármol	48 – 88 – 123	19 – 35 – 49	Clínker	30 – 50	6 – 10

El mortero

El peso específico de los morteros varía entre 15 y 20 kN/m³. Su resistencia a compresión es mucho más reducida que la de la piedra o el ladrillo, pero se ve muy mejorada por el efecto de confinamiento que le otorgan las piezas de piedra o de ladrillo.

La interfaz pieza-mortero

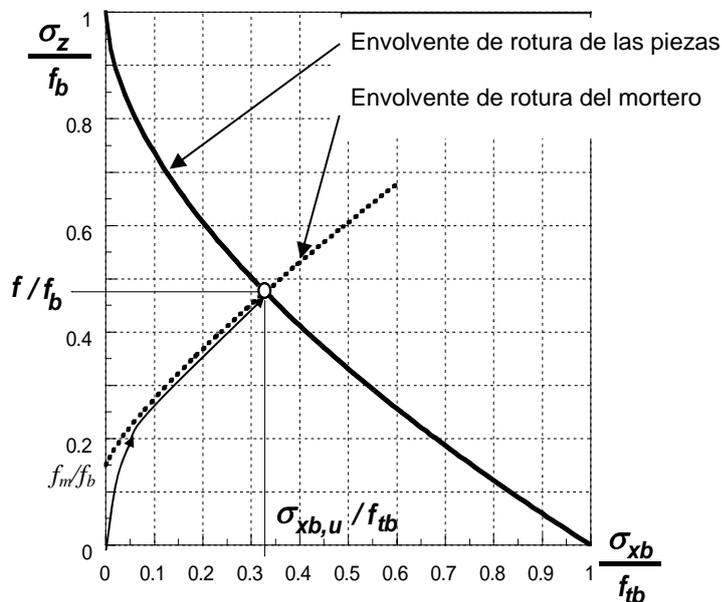
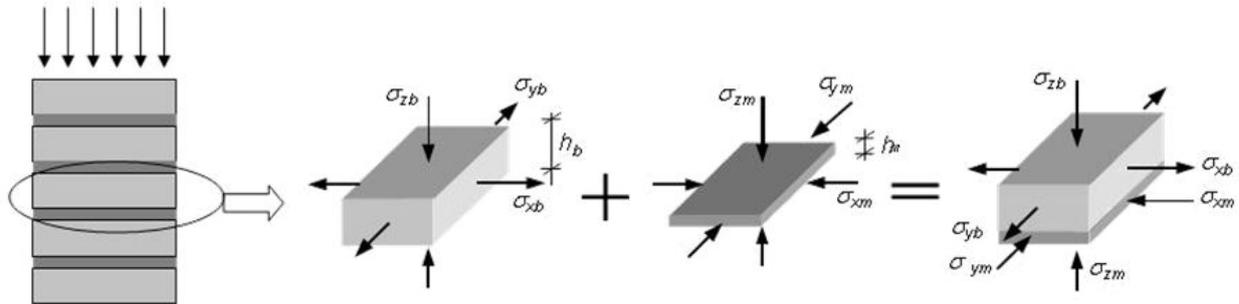
La interfaz entre pieza y mortero se considera aquí como un componente más ya que tiene propiedades peculiares y exhibe un comportamiento que condiciona el de la fábrica y debe estudiarse específicamente. Frente a esfuerzos tangenciales, contenidos en la superficie de la interfaz, se desarrolla una capacidad resistente creciente en función de la compresión normal existente, según la expresión

$$f_v = f_{v0} + \mu \sigma \geq 0,05 f_b$$

donde f_v es la resistencia al deslizamiento del tendel, f_{v0} un valor de la cohesión (los valores típicos están comprendidos entre 0,20 y 0,56) μ el coeficiente de rozamiento en la interfaz (se toma 0,4, aunque está comprendido entre 0,15 y 0,90) y σ la tensión normal al tendel.

Comportamiento conjunto

En el hecho resistente conjunto de piezas y mortero se produce un interesante fenómeno de “solidaridad” entre materiales: la fábrica no resiste tanto como lo haría si fuera monolítica, sin juntas, de una sola pieza de piedra o ladrillo. Tampoco resiste tan poco como lo haría si fuera de mortero, sino que la resistencia del conjunto es un valor intermedio entre ambos.



La figura 6 muestra de manera compacta el resultado de esa interacción, en la que básicamente las piezas (piedra o ladrillo) aportan, por su mayor rigidez, un confinamiento al mortero que ve así aumentada su resistencia en la medida en que aumenta tal confinamiento. Por razones de equilibrio en el comportamiento transversal, las piezas están traccionadas, dando lugar a resistencias más reducidas que si estuvieran solicitadas a compresión uniaxial..

Figura 6. Estado tensional en la pieza y en el mortero en la fábrica sometida a esfuerzos de compresión. Envoltura de rotura de piezas y mortero, respectivamente. Punto de rotura

La resistencia a compresión simple de la fábrica se ha estimado mediante la fórmula de Ohler simplificada adaptada a fábricas de gran antigüedad, que tiene en cuenta los parámetros fundamentales que influyen en esta variable:

$$f = \eta \frac{a f_b}{1 + 10ba}$$

donde los diferentes parámetros tienen los siguientes significados:

- f Resistencia a compresión simple de la fábrica.
- f_b Resistencia a compresión simple de las piezas (sillares o ladrillos).
- η Parámetro que modeliza la menor resistencia de la fábrica trabada que la de un prisma, de valor 0,70.

- α Relación entre el espesor del tendel y el alto del sillar o del ladrillo (muy variable, pero suele ser 0,10 en sillerías y 0,20 en obras de ladrillo).
- a, b Parámetros de cálculo, función del espesor relativo de los tendeles, como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de a y b en función de α .

α	a	b
$\alpha \leq 0,02$	1,000	2,218
$0,02 < \alpha < 0,15$	0,811	0,960
$\alpha > 0,15$	0,662	0,662

Hay también fórmulas empíricas (en las que se basa EC-6), que tienen la forma:

$$f = K f_b^A f_m^B$$

donde f es la resistencia (media o característica) a compresión de la fábrica (referida a las dimensiones del panel ensayado) en N/mm^2 , f_b es la resistencia a compresión de los bloques (referida a un tamaño de probeta concreto) en N/mm^2 y f_m la resistencia a compresión del mortero (referido a un tamaño de probeta concreto) en N/mm^2 . K , A y B son coeficientes que se ajustan experimentalmente. El exponente A toma valores típicos en torno a 0,60, el exponente B alrededor de 0,25 y el coeficiente K suele depender de las características de la fábrica (aparejo, tamaño de las piezas, etc.), siendo variable entre 0,5 y 1,0. Este coeficiente puede llevar incluida la minoración estadística si f es el valor característico en lugar del medio. Sin embargo, a los autores les gustan más las fórmulas fenomenológicas porque se adaptan a distintas tipologías de fábrica y materiales y no sólo a las condiciones con las que fueron obtenidas las fórmulas empíricas. Valga a este respecto la famosa frase de Emil Mörsch: *Nada hay más práctico que una buena teoría.*

Frente a solicitaciones compuestas de axil y tangencial, las cosas se complican notablemente, dando lugar a diferentes modos de fallo, recogidos en la envolvente de rotura de Mann-Müller de la figura 7: rotura de tendeles (interfaz); rotura por generación de estados de tracción-corte en las piezas; y rotura por compresión de la fábrica.

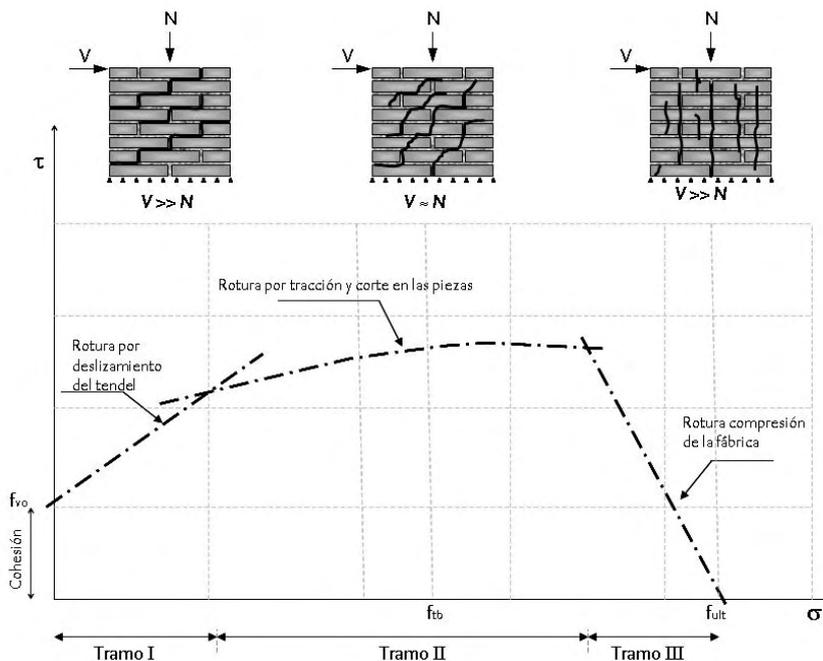


Figura 7. Envolvente de rotura propuesta por Mann y Müller.

3. ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Resulta casi obvio que el análisis de la estructura y su modelización exige, como paso previo, la identificación de los elementos estructurales. No es del todo obvio porque las estructuras de fábrica, generalmente de tipo masivo, no siempre dejan ver cuáles son sus elementos resistentes, debido a la existencia de postizos, ornamentos, rellenos y otros cuerpos que enmascaran y hasta falsean el esquema estructural. El ingeniero debe, pues, estar atento a estas posibles trampas.

Cimentación

La cimentación es la parte resistente peor conocida y, con frecuencia, la más débil de las construcciones de fábrica (figura 8). Eso se debe a su carácter oculto e inaccesible y al hecho, no infrecuente, de se escatimó o se ignoró cómo hacerlo bien. La sensibilidad de las cimentaciones de los puentes a la socavación ha constituido siempre el talón de Aquiles de estas estructuras, casi indestructibles por otras acciones (figura 9).

Los elementos de cimentación típicos, ayer y hoy, son las zapatas, los pozos y los pilotes y su encepado, como se esquematiza en la figura 10. Las zapatas cumplen la función de reducir la presión que transmiten al terreno a base de aumentar el área. Naturalmente, al no disponer de capacidad a flexión, esa transición de áreas debe ser gradual, escalonada, como se muestra en la figura 10. En todo caso, escalonadas en mayor o menor medida, las zapatas se ven sometidas a tracciones en sus caras inferiores, como se ve en la figura 11, que muestra el esquema de funcionamiento de las zapatas de los puentes de fábrica, según un esquema “modernizado”, haciendo uso de un diagrama de bielas y tirantes, en el cual el tirante viene aportado por el rozamiento, un aliado “olvidado” en la ingeniería actual, que confía (y hace bien) las tracciones sólo a materiales capaces como el acero.

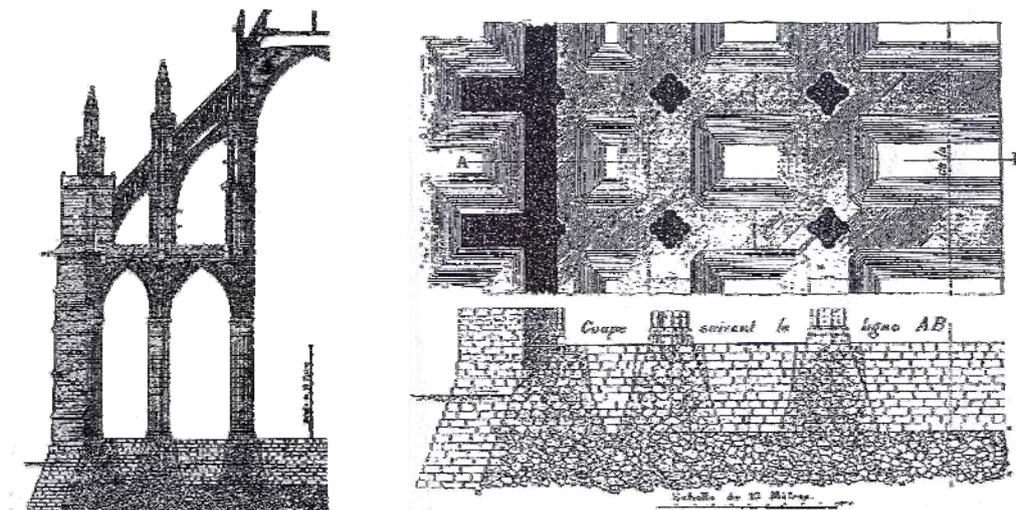


Figura 8. Planta y alzado de la cimentación de la Catedral de Amiens.

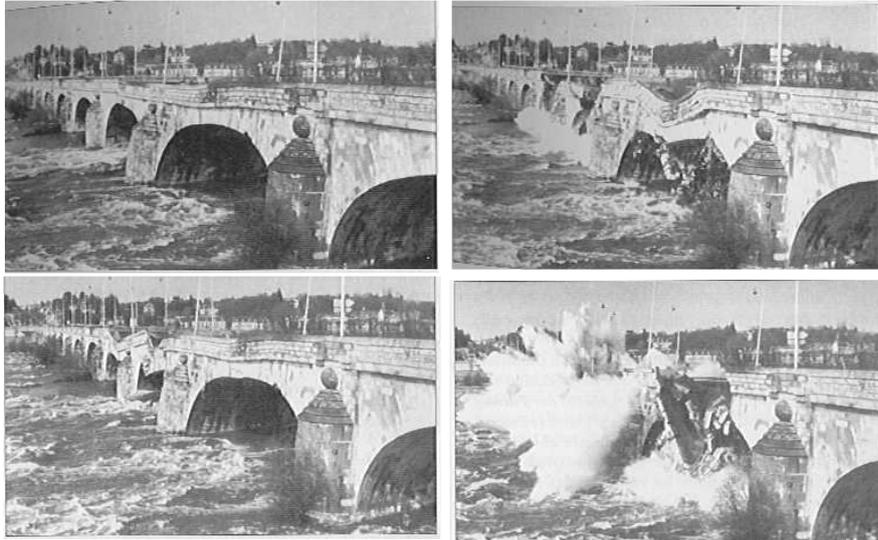
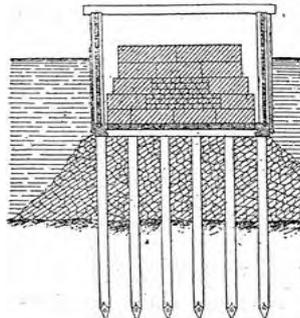
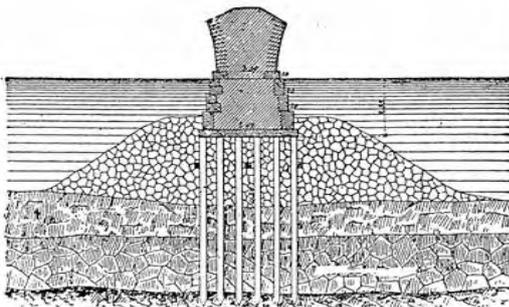
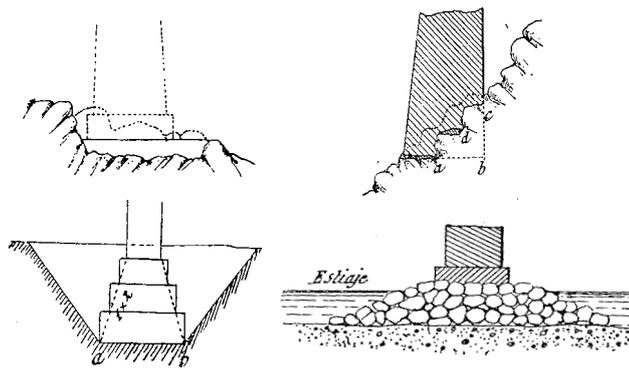


Figura 9. Colapso del puente Wilson en Tours (1978) por socavación.

Soportes y muros

En obras de fábrica, las pilas son elementos dispuestos para transmitir esencialmente las acciones verticales a la cimentación. Además de los datos geométricos (ancho, canto y altura, medida desde la cimentación hasta la impostilla de arranque de las bóvedas), es preciso conocer las características de la sección transversal de las pilas, que puede ser maciza o, más frecuentemente, mixta constituida por una carcasa de fábrica y por un relleno de peor calidad y más deformable (figura 12). En las construcciones romanas suele suceder lo contrario, siendo el núcleo de hormigón igual o más rígido que el contorno.

Estas estructuras suelen ser intraslacionales, debido a la existencia de elementos masivos que aseguran tal intraslacionalidad. Es el caso, por ejemplo, de los pórticos de la mezquita de Córdoba o de ciertas pilas de catedrales góticas (Palma de Mallorca), como se muestra en la figura 13). En este último caso se utilizó un procedimiento simplificado de seguridad “global”, más adecuado ante el comportamiento claramente no lineal que exhibe la estructura —las pilas en particular— y un eventual colapso por inestabilidad.



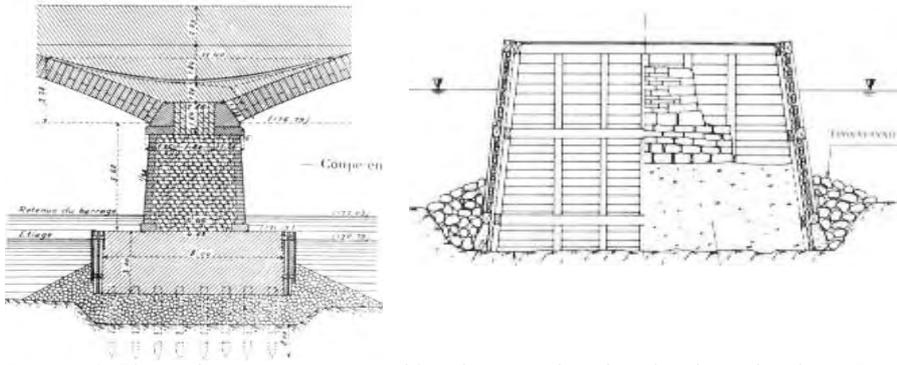


Figura 10. Elenco de cimentaciones posibles, de izquierda a derecha, de arriba abajo. Cimentación directa sin zapata (sobre roca), zapatas escalonada, cimentación con pilotes y encepados. Cimentación mediante pozos o cajones.

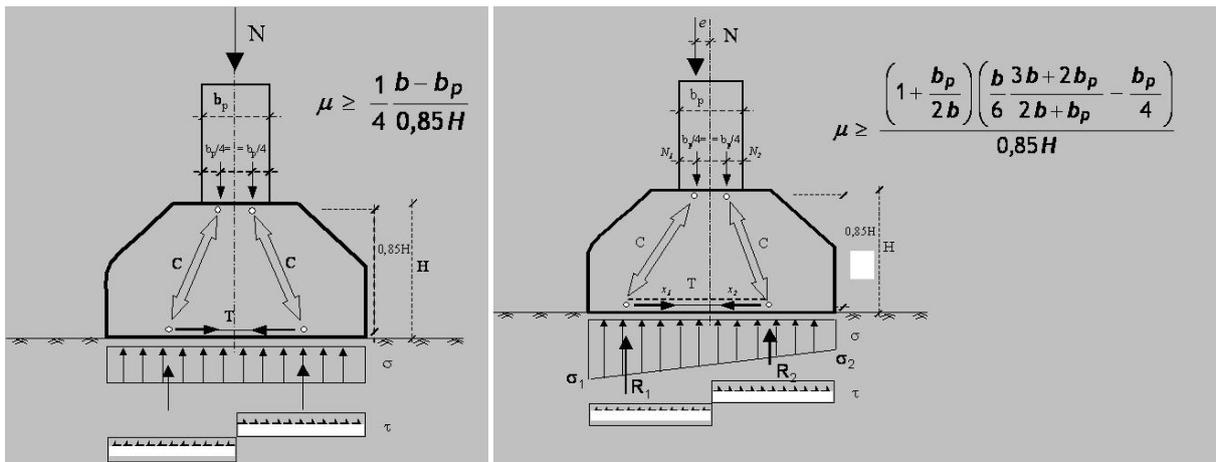


Figura 11. Esquema resistente de una zapata, tanto para cargas centradas como excéntricas, a partir de un juego de bielas comprimidas que, en realidad, parten de la carga que baja por la pila, preferentemente en las hojas exteriores, y se difunden por la zapata generando la necesidad de una fuerza de tracción T que ha de ser resistida por la fuerza horizontal generada como producto del coeficiente de rozamiento μ por la fuerza vertical. En la figura se muestran los valores mínimos del coeficiente μ necesarios en zapatas con carga centrada y excéntrica, dependientes sólo de parámetros geométricos.

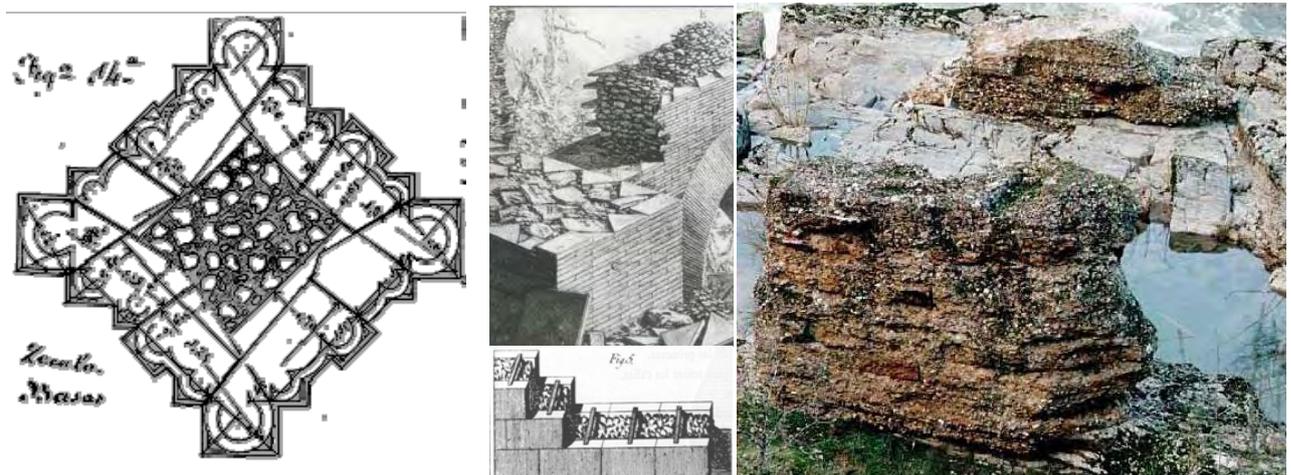


Figura 12. Izquierda, sección transversal de las pilas de la Catedral de León. Demetrio de Los Ríos (s. XIX). Derecha, configuración típica de muros romanos y restos de pilas de hormigón de las que ha desaparecido la hoja exterior de sillería.

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). En otras palabras, se expresa la seguridad en términos de excentricidad real frente a la de colapso, ya que, sin aumento de cargas, un aumento no controlado de la excentricidad podría conducir al colapso. Cabe destacar cómo en ese análisis se han utilizado los procedimientos habituales empleados en las estructuras de hormigón [5], dada su generalidad conceptual, lo que representa un

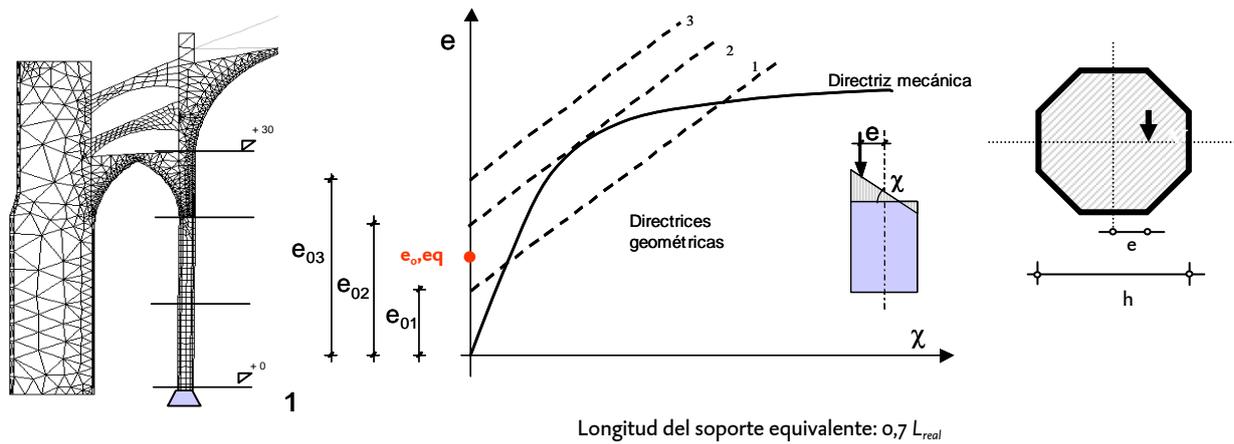
ejemplo de validez del trasvase de conocimientos de unos campos a otros, estrategia que casi siempre ha resultado de gran utilidad.

Arcos, bóvedas y cúpulas

El arco, y sus derivados bóveda y cúpula, constituye uno de los recursos constructivos más ingeniosos que ha producido el ser humano en “su larga lucha contra las tracciones” como recuerda el prof. Mola. Condicionado por la necesidad de seguir utilizando materiales pétreos, el constructor tuvo que ingeniárselas para dar con las formas que aseguraran estabilidad y durabilidad, conjugando tal propósito con el de la viabilidad del proceso constructivo y la economía. En todo caso, no debe olvidarse que también existen dinteles adovelados o simplemente dinteles de un solo tramo que acaban funcionando como arco. El equilibrio es posible si hay estribos capaces de movilizar la reacción horizontal precisa.

Para ahondar en el ya aludido trasvase de conocimientos desde unas disciplinas estructurales a otras, 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 14, 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 un 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.





$$\text{Ratio de seguridad} = \frac{e_{o,\text{lim}}}{e_{o,\text{eq}}} \quad (e_{o,\text{eq}} = 0,6e_{\text{sup}} + 0,4e_{\text{inf}} \leq 0,4e_{\text{sup}})$$

Figura 13. Soportes —apenas bielas biarticuladas— en la mezquita de Córdoba (izquierda) y pilas esbeltas en la Catedral de Palma de Mallorca (derecha).

Las bóvedas admiten diferentes aproximaciones. La más inmediata es la de las bóvedas de cañón, cualquiera que sea su directriz, puesto que, para carga uniforme, el problema es idéntico al del arco, cuyos parámetros definitorios se acaban de definir. Un caso particular, propio de puentes de fábrica del s. XIX, cuando los trazados del ferrocarril imponían sus condiciones a las estructuras (y no al revés, como había sucedido hasta entonces) es del de las bóvedas de puentes esviados. La figura 15 muestra el caso de un puente ferroviario cuya construcción representó, en primer lugar, una complicación notable tanto desde el punto de vista de la cimbra como de la estereotomía de la piedra, dispuesta de esa manera con el fin de adaptarse mejor al comportamiento deseado de compresiones lo más ortogonales posible a los tendeles. El ancho de la bóveda y el ángulo de esviaje son los datos complementarios a los ya enunciados para definir adecuadamente la bóveda.

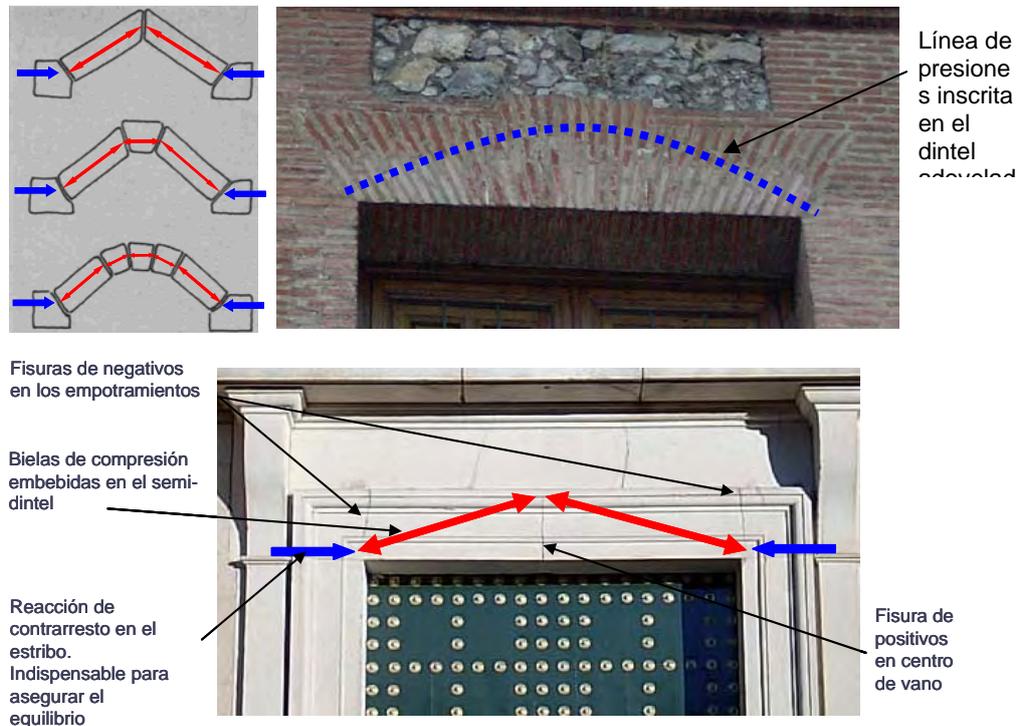
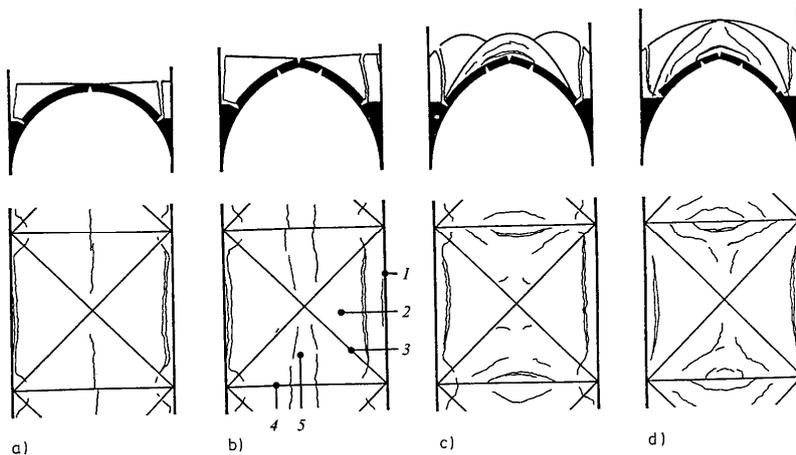


Figura 14. Génesis supuesta del arco y “arcos planos”. Esquema de bielas en equilibrio en el dintel-arco sobre la puerta central de la fachada oeste del monasterio de El Escorial.



Figura 15. Puente esviado de bóveda de fábrica. Línea Venta de Baños – Santander.

Barthel [29] ha estudiado la cinemática de bóvedas de crucería en función de las dimensiones relativas en planta y, sobre todo, la configuración de las superficies cerradas por la plementería. Como puede verse en la figura 16, el comportamiento cinemático frente a movimientos impuestos en los arranques (tendiendo a aumentar la luz) es notablemente diferente. En consecuencia, un dato complementario para abordar el análisis de este tipo de elementos es el de la configuración geométrica de los diferentes módulos en los que se descompone una bóveda de aristas o de crucería. El mismo autor, que ha simulado el comportamiento hasta estados avanzados de carga con objeto de reproducir los patrones de fisuras y grietas detectadas en casos reales, sugiere cómo el funcionamiento de la bóveda es tal que las compresiones se dirigen en la dirección de las fisuras, lo que permite, en ciertos casos, la modelización simplificada del problema.



El comportamiento de las bóvedas se torna cada vez más complejo a medida que la planta deja de parecerse a la de la intersección de dos cañones ortogonales. Es el caso, por ejemplo, de las bóvedas en las zonas de girola de las iglesias y catedrales góticas o los cimborrios, como se muestra en la figura 17.

Figura 16. Cinemática de bóvedas de crucería según R. Barthel.

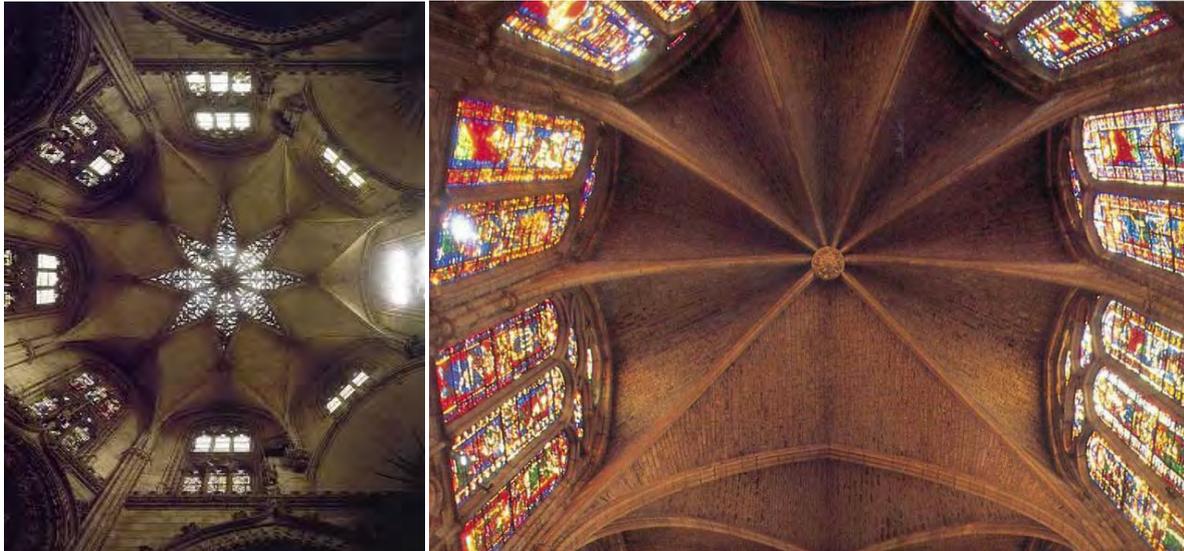


Figura 17. Bóveda en la Catedral de Burgos y bóveda alta en la Catedral de León.

En el caso de los puentes, el funcionamiento de la bóveda, favorablemente condicionado por el relleno, queda caracterizado por los parámetros indicados en la figura 18.

Relleno

La misión estructural del relleno —cuyo nombre parece sugerir algo secundario, sin importancia— es fundamental. Se trata de un elemento relativamente poco estudiado, pero que sirve, en puentes o en pisos abovedados, para repartir las cargas aplicadas en la plataforma hacia la bóveda resistente, confinar —y pretensar— a ésta y hasta servir de elemento resistente, si está cementado, cuando la línea de presiones, para ciertas directrices y condiciones de carga, caiga fuera de la propia bóveda (figura 19). Para calibrar ese triple importante papel es necesario conocer la naturaleza del relleno (rígido o granular, más o menos compactado) y su distribución en la estructura. Aunque esto está más bien poco documentado, la altura de los rellenos en bóvedas de edificación puede suponer el 60% de la flecha, una altura equivalente a la mitad de la flecha más un canto en clave en el caso de puentes de carretera y prácticamente la flecha (80-90%) en el caso de los puentes ferroviarios, como han podido determinar los autores en recientes ensayos hasta rotura de puentes reales³ (figura 20).

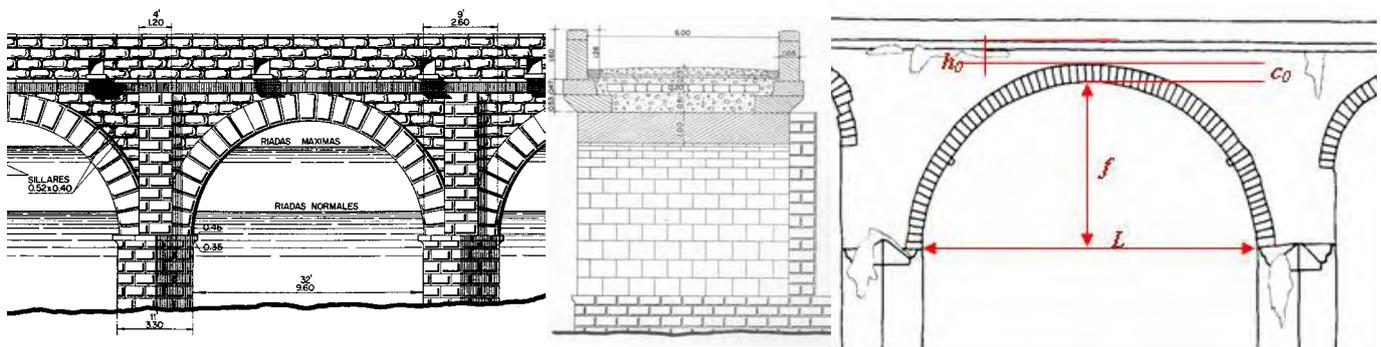


Figura 18. Configuración típica de bóvedas de puentes y parámetros fundamentales: luz, flecha, canto en clave y sobre-espesor en clave. Asimismo resulta crucial conocer la altura del relleno rígido del trasdós en las sillas.

³ Ensayo hasta rotura en el puente de la Riera del Rubí (Barcelona, 2005, para ADIF, junto a otras empresas) y Urnieta (2007, para la Diputación Foral guipuzcoana).



Figura. 19. Trasdós de las bóvedas de la girola de la Catedral de León y su relleno.

Tímpanos

Estos elementos constituyen las enjutas de los arcos y tienen la doble misión de contener los rellenos del trasdós y rigidizar, en su plano, los arcos, transmitiendo hacia éstos las cargas provenientes de la parte superior (figura 20). La misión de los tímpanos es especialmente importante en puentes, pues de su existencia y buen funcionamiento depende la adecuada acción del relleno, especialmente en puentes de relleno rígido o cementado poco alto (puentes medievales).

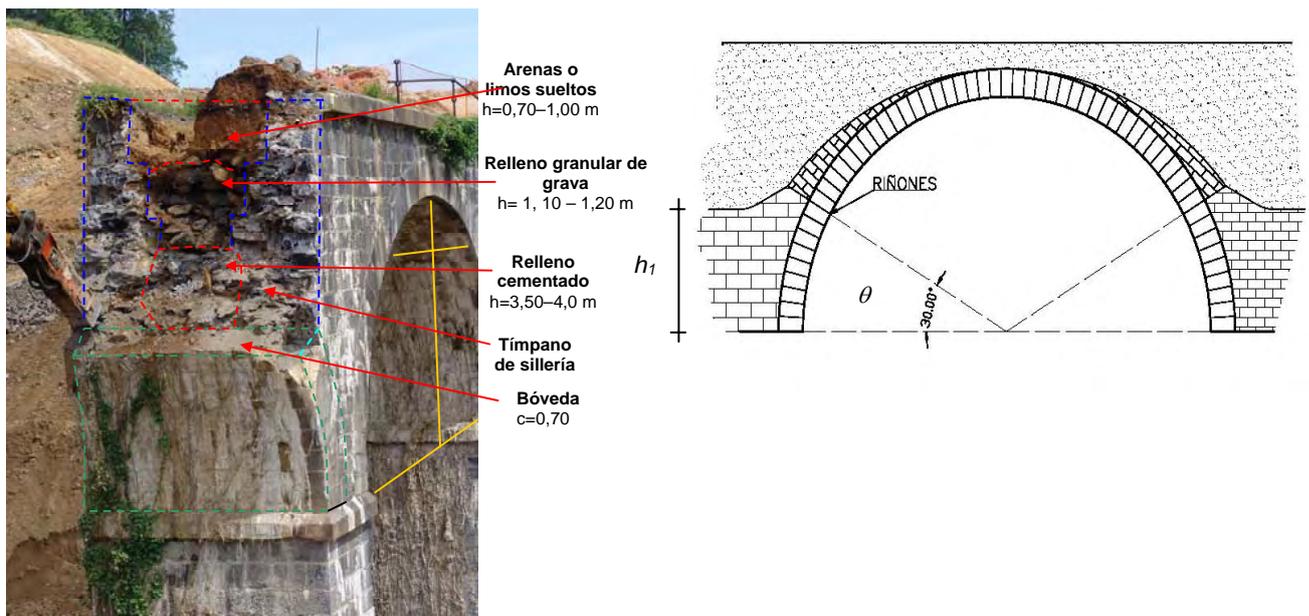


Figura 20. Sección transversal del puente de Urnieta, ensayado por los autores. Se aprecia la naturaleza de los diferentes rellenos y la configuración de los tímpanos.

Contrafuertes y arbotantes

La misión de estos elementos es conducir hacia la cimentación los empujes horizontales de las bóvedas y arcos. En el caso de los contrafuertes, interesa destacar asimismo su importantísimo papel como elementos rigidizadores que permiten asegurar, especialmente en el caso de las catedrales góticas, que las pilas funcionan como bielas comprimidas, esto es, sin flexiones significativas. No debe olvidarse que juegan un papel esencial en esta misión los pináculos, objetos que no sólo son de ornato. La modelización de estos elementos deberá considerar también la existencia de patologías previas como fisuraciones, desplazamiento de dovelas, etc. que condicionan, como en los arcos, el esquema estático.



Figura 21. Contrafuertes y arbotantes en el lado sur de la cabecera de la Catedral de León.

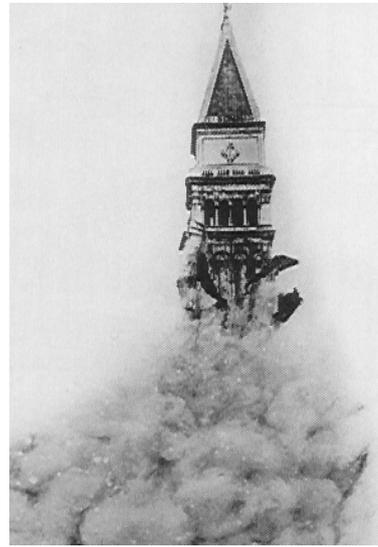


Figura 22. Colapso del Campanile de San Marcos en Venecia.

Torres y cimborrios

Estos elementos estructurales, especialmente sensibles y poco o nada dúctiles (fig. 22) exigen una consideración muy particular. En ellos se hallan presentes elementos ya descritos, como contrafuertes, muros, arcos, bóvedas y hasta cúpulas. De los modos de fallo de estos elementos estructurales se tiene, desgraciadamente, un conocimiento especialmente limitado.

Denominador común de todos los aspectos indicados es que el comportamiento de los elementos estructurales y aun de la estructura en su conjunto depende de manera muy importante de cómo son los materiales (tipos de piedra, ladrillo, morteros, características del aparejo y espesores de tendeles y llagas, existencia de grapas o llaves, etc.) y de cómo se distribuyen éstos.

Otro aspecto de gran interés es que se conozcan los ratios caracterizadores de la estructura o de sus componentes, es decir, las relaciones canto-luz, ancho de pila-luz, flecha-luz, etc. El conocimiento de esos valores permite tener una idea acerca de si tales elementos responden a un patrón previamente estudiado. En caso afirmativo, la respuesta acerca de la capacidad resistente puede resolverse, en primera aproximación, por la vía “analógica”.

4. MECANISMOS DE DETERIORO

Las obras de fábrica experimentan tres tipos de deterioro: los inducidos por problemas en la cimentación (figura 23), los debidos a las cargas o a unas inadecuadas condiciones de explotación y, finalmente, los debidos a la degradación de los materiales.



Figura 23. Distorsiones inducidas en un puente por problemas de cimentación de la pila derecha (figura izquierda). Deformaciones producidas durante la construcción por movimientos de la cimbra (figura de la derecha), como se deduce del hecho de que las hiladas superiores no presentan distorsión. El ingeniero debe estar atento a estas consideraciones.

Aunque de mucha mayor durabilidad que otros materiales de construcción, ya se ha dicho, las fábricas experimentan deterioros que, antes de la invención del cemento p \acute{o} rtland, se concentraban en los morteros, el componente cuya parte exterior era f \acute{a} cilmente reponible (algo as \acute{i} como la pintura en las estructuras met \acute{a} licas). Asimismo se acud \acute{i} a al revoco general de las f \acute{a} bricas con morteros de cal, permeables y verdaderamente protectores de las f \acute{a} bricas. En este punto es imprescindible contar con estudios petrol \acute{o} gicos, con el fin de caracterizar las f \acute{a} bricas, diagnosticar correctamente el origen de sus da \acute{n} os y, consiguientemente, determinar la soluci \acute{o} n terap \acute{e} utica \acute{o} ptima.

La figura 24 muestra un ejemplo de los perniciosos efectos de un err \acute{o} neo (y muy frecuente) rejuntado con mortero de cemento p \acute{o} rtland.

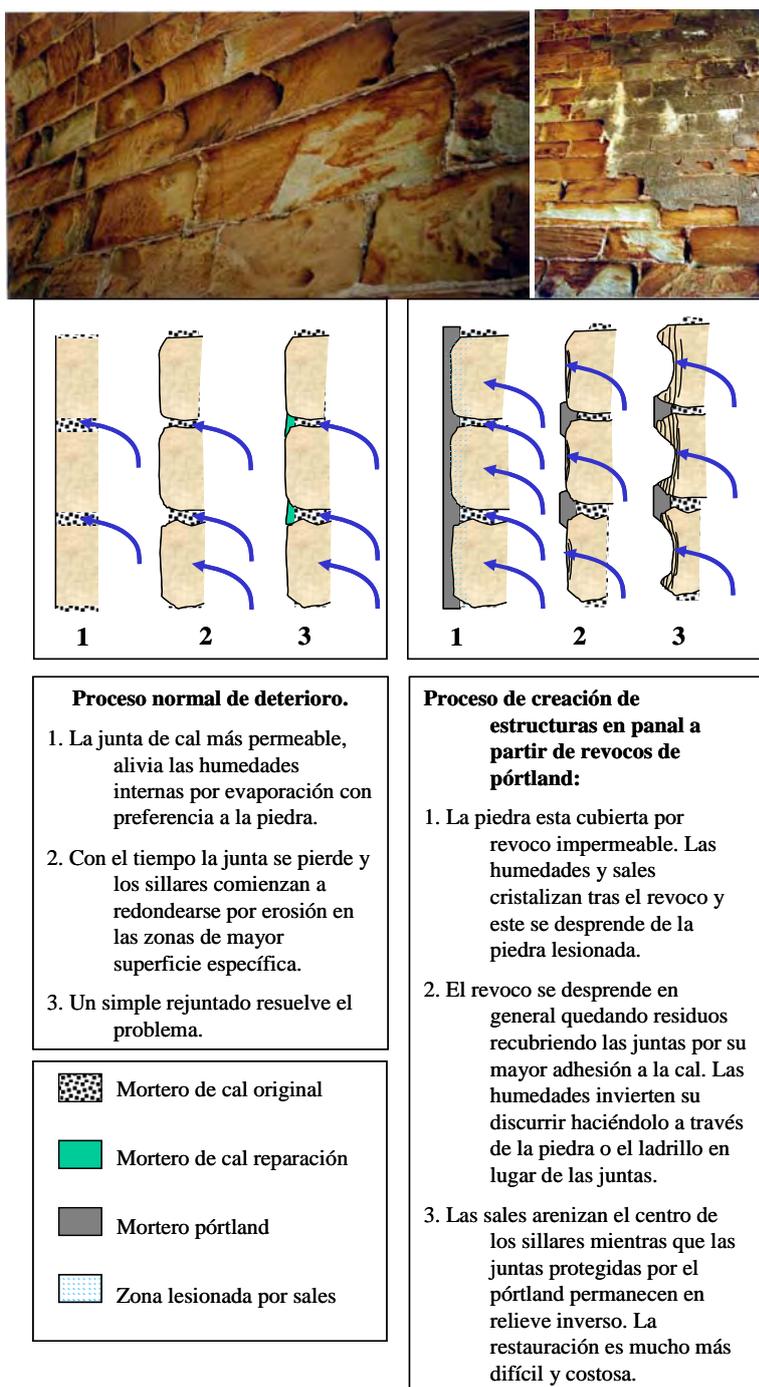


Figura 24. Diagn \acute{o} stico de los efectos de los revocos y rejuntados con P \acute{o} rtland.

5. PROYECTOS DE REPARACIÓN

Como en toda construcción, el formato conceptualmente válido para el tratamiento de las construcciones existentes consiste en comparar las solicitaciones con las capacidades resistentes. Lo primero se resuelve con el tan justamente ponderado análisis estructural, dotado hoy de herramientas poderosas, pero que deben emplearse con mucho juicio, y haciendo uso de diferentes aproximaciones (figura 25). El análisis estructural de obras de fábrica requiere de metodologías especiales y de mentalidades adaptadas a estructuras que no son, como de manera casi exclusiva se enseña en las universidades, medios continuos, ni formadas por materiales que resisten tan bien en tracción como en compresión, sino estructuras discontinuas, capaces de resistir elevadas compresiones pero incapaces de resistir tracciones simples, aunque movilizan mecanismos resistentes (a base de rozamiento, siempre que haya fuerzas normales a las juntas, con coeficientes de rozamiento del orden de 0,7).

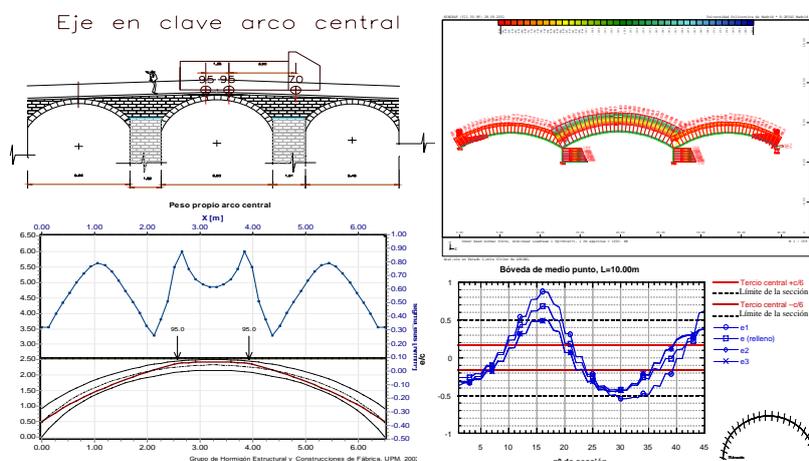


Figura 25. Síntesis del análisis estructural llevado a cabo sobre un puente de fábrica, que bien podría ser romano, según diferentes procedimientos: análisis lineal (corregido para tener en cuenta diferentes no linealidades).

No debe perderse de vista que el propósito fundamental es entender el funcionamiento de la estructura y, después, detectar coincidencias entre los daños observados y las zonas de máximas solicitaciones, 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. (figura 26). Un análisis 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.

En opinión de los autores, los procesos de calibración del nivel de seguridad, de estimación de la vida útil y de reparación se debe basar en los siguientes principios:

- Identificar los elementos estructurales, es decir, los que son protagonistas del hecho resistente de la construcción, como se ha visto en el apartado 3, tarea nada simple. 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 (figura 27). 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.

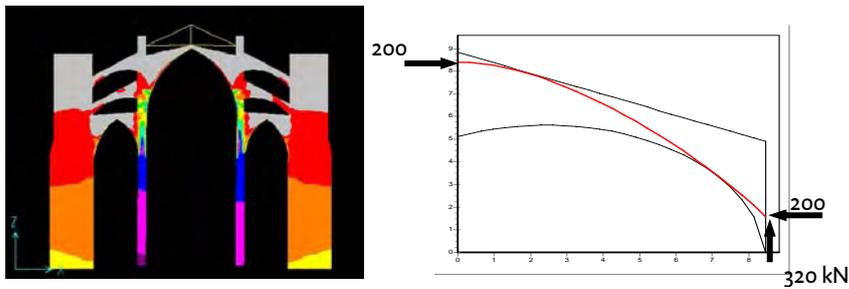


Figura 26. Catedral de Palma de Mallorca. Análisis plano de la sección transversal de la (modelo de elementos finitos) y estudio de un arbotante bajo mediante técnicas de análisis límite.

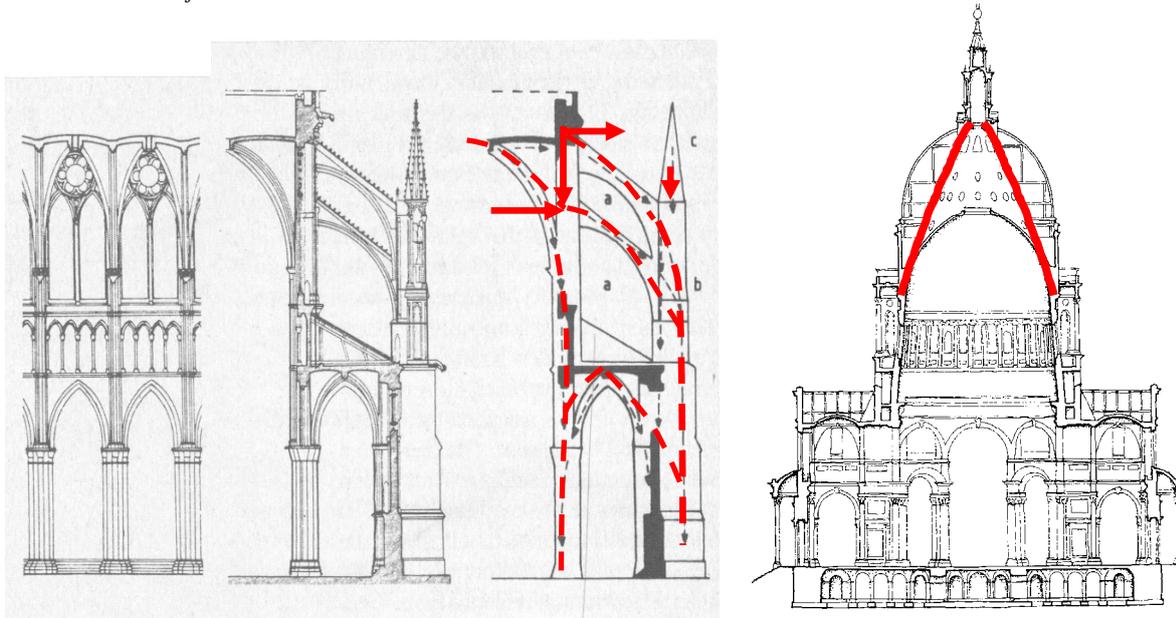


Figura 27. Esquema de líneas de presión (lugar geométrico de los puntos de paso de la resultante de esfuerzos en una catedral gótica (izquierda) y en una barroca (catedral de S. Pablo en Londres).

- 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 (formación de mecanismos, diversas formas de agotamiento, inestabilidad, etc.), 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 citados modos de fallo. 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 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.

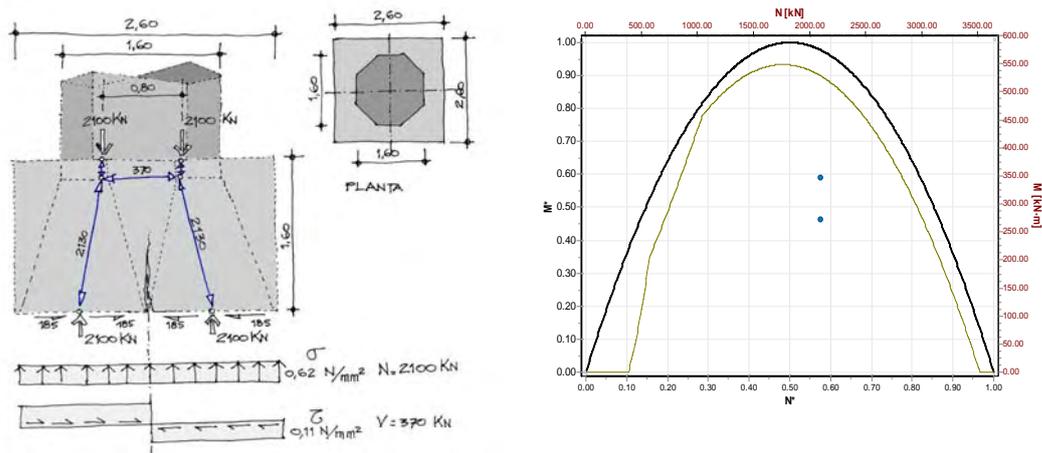


Figura 28. Comprobación de la cimentación de la catedral de Palma (izquierda) y de los pares (N_d , M_d) en el diagrama de interacción.

- 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.

REFERENCIAS

1. GONZÁLEZ, A. (200) Intervenciones en el Patrimonio Arquitectónico. Diputación de Barcelona. Barcelona.
2. PIEPER, K. (1983) Sicherung historischer Bauwerke. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn. Berlin-München.
3. MOLA, F. (2000) Intervención en la Basílica de San Marcos de Venecia. Madrid. IABSE-Fundación COAM. Conferencia pronunciada el 13 de noviembre de 2000.
4. MARTÍNEZ, JL; MARTÍN-CARO, JA, LEÓN, J. Martínez, J.L.; Martín-Caro, J.A. León, J. (2001) *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.
5. CORRES, H.(1980) *El método de las curvaturas de referencia*. Tesis Doctoral. ETSICCP. Madrid,