

## CÓMO Y POR QUÉ SE AGUANTAN LOS EDIFICIOS ROMÁNICOS?

Cuántas veces nos hemos preguntado por qué muchos edificios "antiguos", griegos, romanos, bizantinos, románicos o góticos, aún están en pie y en cambio las construcciones "modernas" duran tan poco tiempo. Al decir que están en pie estamos ya haciendo referencia a su estabilidad, al hecho de que todavía se aguantan; por tanto, de forma un tanto inconsciente, estamos señalando el hecho de que su estructura era muy estable, aún que sus acabados interiores o sus cubiertas estén ya muy mal o incluso, desaparecidas.

### **0.-DEFINICIONES PREVIAS.-**

Las razones de este comportamiento tan extraordinario de los edificios "antiguos" son el principal motivo del presente trabajo. Intentaré pues exponer unas cuantas razones que lo expliquen, utilizando el mínimo posible de conceptos matemáticos o excesivamente especializados. Por ello hablaré del estado de equilibrio, de los esfuerzos de compresión y tracción y de cuales son las condiciones que un edificio ha de reunir para ser duradero y aguantar el paso del tiempo.

- a) **Estado de equilibrio.-** Diremos que un edificio está en equilibrio cuando todas las acciones exteriores y las fuerzas interiores a las que está sometido, están contrarrestadas o se anulan las unas a las otras.

Cuáles son las acciones exteriores? Todos los esfuerzos que el entorno del edificio aplica sobre él, como el viento, la lluvia, la nieve, los sismos, la gravedad y otras.

- b) **Compresión y tracción.-** Son los principales tipos de esfuerzos que pueden resistir los materiales que componen principalmente la estructura resistente. Para no complicarnos más podemos decir que la compresión es una fuerza que tiende a aplastar los materiales y que la tracción es una fuerza opuesta a la anterior y que lo que hace es estirar la pieza a la que está aplicada.

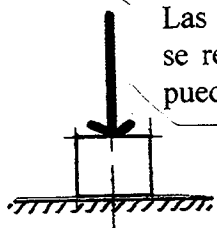
### **Nota aclaratoria.-** (Concepto de fuerza.)

Cuando hablamos de esfuerzos hablamos de **fuerzas** o sea de acciones que aplicadas a cuerpos sólidos alteran o son capaces de alterar su estado de equilibrio. Si el sólido está en reposo una fuerza lo pondrá en movimiento; si está en movimiento uniforme (velocidad constante) lo frenará o lo acelerará. Este hecho constituye la 2ª Ley de Newton que dice que " fuerza es igual a masa multiplicada por aceleración"...  $F = m \times a$ .

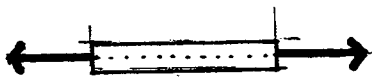
Un claro ejemplo es la fuerza de la gravedad. El peso de un cuerpo físico es una fuerza. Como que las fuerzas se miden en kilogramos, un kilogramo es la fuerza con que la gravedad terrestre atrae a una masa de un kilogramo con una aceleración de 9,8 metros cada segundo.

Las fuerzas pueden ser horizontales, verticales o inclinadas; para estudiarlas mejor se representan con flechas y se descomponen al menos en dos componentes, que pueden ser, por ejemplo, una fuerza horizontal y otra vertical.

### GRÁFICOS DE LOS ESFUERZOS



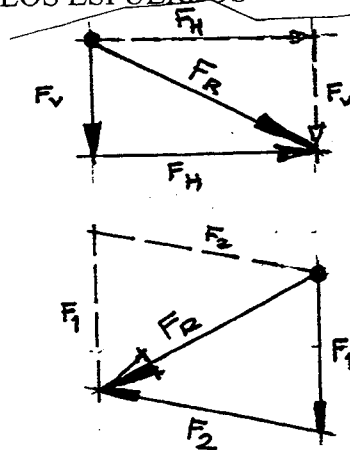
COMPRESIÓN



TRACCIÓN



FLEXIÓN



### DESCOMPOSICIÓN DE FUERZAS

— VERTICAL/HORIZONTAL  
 $F_R = \text{RESULTANT}$

— VERTICAL/INCLINADA  
 $F_R = \text{RESULTANT}$

- c) **Condiciones de durabilidad.**- Decimos que un edificio se aguanta o que es sólido cuando tiene al menos las siguientes cualidades:

**Resistencia.**- Un edificio es resistente cuando puede soportar cualquier tipo de esfuerzos o acciones exteriores, "cargas", (de magnitudes usuales, claro...)

**Rigidez.**- Un edificio es rígido cuando no se deforma "excesivamente" (concepto relativo, no?)

**Estabilidad.**- Un edificio es estable cuando no sufre desplazamientos ni parciales ni globales (cambios de posición) bajo la acción de las fuerzas exteriores o interiores en su totalidad o en alguna de sus partes.

Si aplicamos estas condiciones a un edificio de piedra diremos que es resistente porque sus muros y columnas pueden resistir mucho peso; que es rígido porque sus muros no se deforman haciendo grandes abombamientos ni cambios de forma que impidan sus usos normales, y finalmente, que es estable, porque resiste empujes, inclinados o no, "sin salirse de su sitio".

## 1) LA ESTRUCTURA DE LOS EDIFICIOS ROMÁNICOS.-

Después de lo expuesto hasta aquí, ya podemos responder a la cuestión de por qué un edificio se aguanta. Responderemos simplemente que se aguanta porque tiene una estructura que cumple lo que hemos definido como condiciones de durabilidad, o sea que es **resistente, rígido y estable**.

Podemos decir algo más. Un edificio está esencialmente compuesto por una serie de **materiales de construcción** con unas disposiciones determinadas a las que llamamos **aparejos**. Por ejemplo, un muro de piedra está formado por "trozos de roca", mejor o peor tallados, y colocados bien trabados, formando hiladas horizontales o de otras clases.

Pero no es suficiente con lo dicho. Hay que conseguir que ambos sistemas, materiales y aparejos, sean capaces de aguantarse a sí mismos y resistentes a las cargas exteriores e interiores. Esta es la **misión de la estructura del edificio**. En nuestro caso, la estructura se caracteriza por ser un conjunto de muros de carga, los cuales bien trabados entre sí, constituyen unas "cajas" rígidas que soportan muy bien las cubiertas, las bóvedas y en general, todos los pesos del edificio. Debido a esta función característica, los muros tienen gruesos muy importantes y escasas aberturas (ventanas y puertas) que los debilitarían, pero a cambio, dejan entrar poca luz exterior a su interior.

### 1.1.- Las aberturas.-

Qué pasa cuando es necesario hacer en los muros una abertura, sea puerta o ventana? Pues simplemente que el muro pierde su continuidad y por ello se dispone encima de la abertura un elemento constructivo, hecho con el mismo material que el muro, que en general denominamos "arco", el cual forma una pequeña bóveda con el mismo grueso que el muro y que descarga los pesos superiores hacia ambos lados de la abertura. Estos arcos que pueden ser también de gruesos diversos, son siempre de **medio punto**, es decir, una semicircunferencia, evolucionando hacia los siglos XII y XIII hacia una forma apuntada. En casos muy sencillos o primitivos podemos encontrar un "dintel" en lugar del arco, que no es más que una pieza de piedra de mayores

dimensiones que las que componen el muro, y que al igual que el arco, descarga los pesos superiores hacia las jambas o costados verticales de la abertura. Esta misma función, o sea, poder hacer aberturas en los muros sin disminuir su estabilidad, es la que cumplen los "arcos formeros", es decir, aquellos arcos que en el caso de edificios de más de una nave, sustituyen a los muros apoyándose en pilares o columnas, cumpliendo la misma función que los muros pero permitiendo la comunicación entre las diferentes naves, tanto visual como auditiva y espacial.

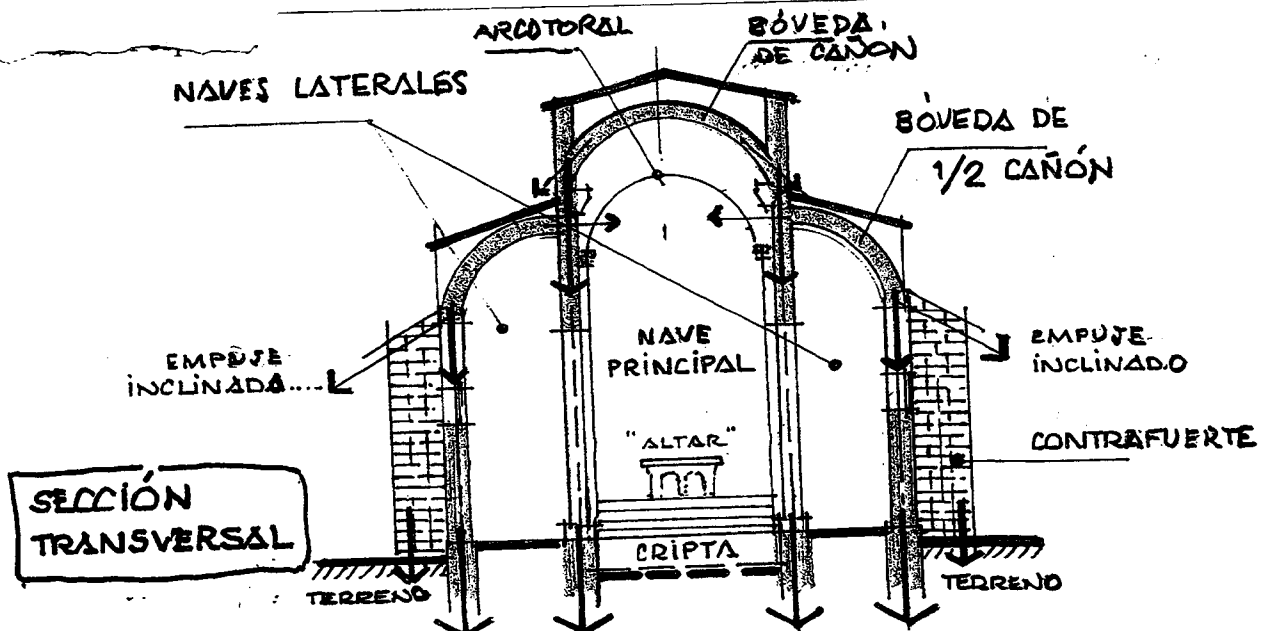
**1.2.- Los empujes inclinados.-**

Hasta aquí hemos empezado a ver como están hechos los edificios románicos y también a ver la misión de su estructura. A nadie se le escapa, mirando el gran grosor de los muros que éstos deben de pesar mucho y es probable que alguien piense que es por esta razón ( su gran peso) que han de ser muy gruesos.

También es posible que alguien llegue a pensar que han aguantado tantos siglos porque estas dimensiones tan grandes le aumentan su durabilidad. Todo esto es verdad, pero ...hay algo más en la estabilidad de estos edificios que ha influido decididamente en su forma y dimensiones.

Si nos fijamos en la forma que tienen los arcos y las bóvedas, sean de medio punto o apuntados, nos daremos cuenta de que sobre ellos descargan muchos elementos constructivos como muros, techos, pavimentos, terrados o tejados y que todos ellos también deben pesar muchas toneladas o sea, millares de kilogramos. Todos estos pesos, por aquello de la gravedad, son fyuerzas que siguen la dirección vertical en dirección hacia la tierra. A pesar de ello, los arcos y las bóvedas no son elementos verticales, sino superficies curvas de pequeño grosor en comparación con los muros, formados con piezas pequeñas pero bien dispuestas, unas al lado de las otras, siguiendo su curvatura.

**Este es su secreto.** A pesar de estar hechos con muchas piezas pequeñas tiene la capacidad de transmitir los pesos que gravitan sobre ellos hacia los elementos verticales en los que se apoyan,... pero lo hacen en forma de empujes inclinados que tienen más o menos la dirección del interior de los arcos o de las bóvedas. Esta es la razón principal de que los muros sean gruesos, puesto que a los muros les corresponde resistir el empuje inclinado y transportarlo lo más verticalmente posible hacia sus partes bajas o a su cimentación (si existe), y además, deben **hacerlo sin volcar**, es decir, sin perder la verticalidad.

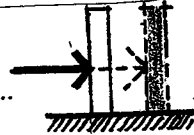


## 2.- LA TÉCNICA DE LOS CONSTRUCTORES MEDIEVALES

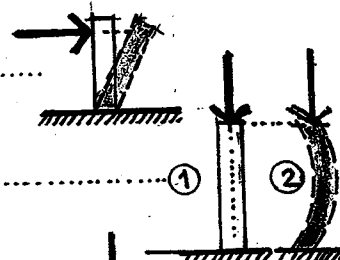
El ingenio y la habilidad de los constructores medievales les permitió desarrollar mecanismos y disposiciones constructivas para que los muros o los soportes ( pilares o columnas) no perdieran la verticalidad bajo la acción de los empujes inclinados.

A pesar de ello hay veces en que se producen desequilibrios por la falta de previsión o por la magnitud y sentido de estos empujes. Los problemas más frecuentes que aparecen son:

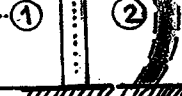
Desplazamientos horizontales.....



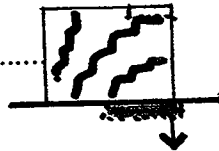
Desplomes (pérdidas de verticalidad).....



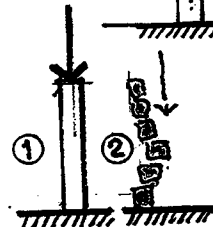
Pandeo o abombamiento .....



Las grietas .....



El colapso (derrumbe incontrolado).....



Así que los constructores románicos tiene que exprimir su ingenio y talento constructivo para conseguir que sus edificios sean capaces de resistir todos los diferentes esfuerzos que hemos descrito, sin sufrir graves problemas y así poder transmitir a las generaciones posteriores, **el testimonio real de su arquitectura.**

.....  
Algunos **métodos o sistemas** empleados por los maestros de obras medievales.-

2.1.- En primer lugar escogen para construir sus muros materiales naturales, es decir, que se los proporciona la madre naturaleza, los cuales tienen entre sus propiedades físicas una muy destacada: la **resistencia a la compresión.** El más empleado de estos materiales es la **pedra.** Este material se encuentra generalmente por todas partes, no muy lejos del lugar donde se quiere emplazar el edificio, con lo cual además ahorran dinero en transportes. Tiene en general una resistencia a la compresión muy alta; así por ejemplo, una piedra arenisca de calidad media tiene una tensión de rotura a compresión del orden de 4.000 kilogramos por centímetro cuadrado y una densidad de unos 2.000 kg. por metro cúbico. Esto supone que en teoría se podría hacer una columna de 2.000 metros de altura hasta se aplastase bajo la acción de su propio peso. Si para estar más seguros adoptamos un coeficiente de seguridad de 1/10, es decir, suponer que la resistencia es "sólo" de 400 kg. por cm<sup>2</sup>, la columna sería de 200 metros.

Muy raramente encontraremos en edificios medievales columnas o pilares de altura superior a los 40 metros, o sea, una quinta parte de los 200, y por tanto, el coeficiente de seguridad se ampliaría a 50 ( 10 de la resistencia y 5 de la altura), o sea 10 por 5 .

Ya tenemos una primera explicación de nuestro dilema : la gran cualidad resistente de la piedra. Por si fuera poco este material es además incombustible, muy abundante en la naturaleza y de manipulación sencilla.

2.2.- Estos hábiles constructores medievales conocen la existencia de los empujes inclinados, aún que sea de una forma práctica. No saben calcular estructuras pero saben muy bien, como se comportan sus componentes; no tienen "ordenadores", pero sí tienen experiencia y tradición oral y sus gremios profesionales son un gran depósito de conocimientos empíricos, guardados muy celosamente **como secretos del oficio**.

Es por ello que :

Hacen los muros bien gruesos y reforzados con columnas y pilares adosados.

Disponen contrafuertes en los puntos donde se concentran los empujes inclinados.

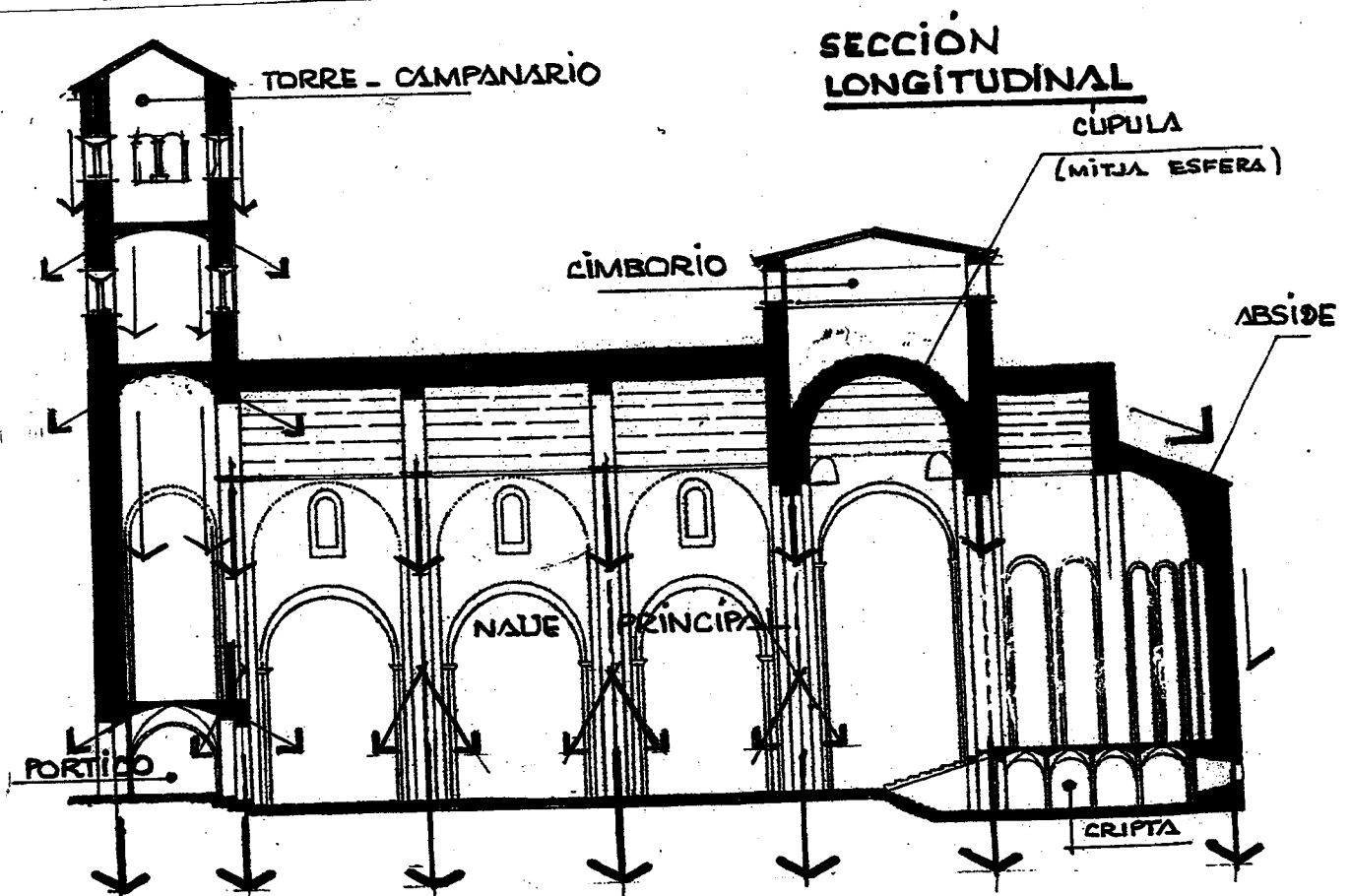
Ponen una bóveda al lado de la otra bóveda para contrarrestarla.

Añaden pórticos a las fachadas también con función de contrarresto.

Disponen ábsides con bóvedas de cuarto de esfera.

Proyectan torres de campanarios sobre las fachadas para aumentar las componentes verticales de los pesos.

Todas estas medidas constructivas son una serie de explicaciones de la gran resistencia de sus edificios , porque con ellas consiguen conducir los esfuerzos inclinados hacia la tierra ( o el cimiento) sin alterar el equilibrio de los elementos sustentantes.



2.3.- El arquitecto medieval, o el constructor, maestro de obras o como queramos llamarle, no sabe apenas nada de cálculo estructural, comportamiento plástico de los materiales ni nada de lo que hoy se emplea en la moderna construcción. **De lo que sí sabe es de geometría básica, de las reglas de las proporciones, de la importancia de la forma y de las propiedades de los materiales que utiliza.** Seguramente habría que diferenciar entre el nivel de conocimientos de los constructores de obras rurales y el de los constructores de catedrales, claro....

Los antiguos constructores han descubierto de forma empírica, es decir, fruto de la **experiencia** constructiva, la relación fundamental entre **forma y estabilidad**.

#### 2.4.- A modo de resumen y un poco de historia.-

**Experiencia.-** Que podemos fácilmente cifrar en más de tres mil años. En efecto sólo hace falta releer en el Antiguo Testamento, el Libro del profeta Ezequiel (cap. 40-41-42) donde se describe la construcción del gran Templo de Jerusalén, poniendo de manifiesto la importancia de las proporciones hechas a partir de una "gran medida" como un módulo que permitía establecer las dimensiones, no a partir de una unidad de medida (metro, centímetro, etc.) como hoy, sino como múltiplos o submúltiplos de la percha o vara de medir bíblica.

Un sistema similar aparece también al Tratado de Vitrubio, arquitecto romano, escrito más de cinco siglos después y en el cual aparece la "gran medida" i la "**ordinatio**" como proporciones, de la misma manera que el escultor clásico conoce un **Cánon** y sabe que cualquiera que sea la dimensión total de la figura humana, la relación entre una parte de la figura y otra parte siempre será la misma.

Puestos a citar grandes figuras de la construcción medieval, tendríamos que hablar de Villard de Honnecourt o mejor, de su famoso álbum o cuaderno de notas, el cual, más que un tratado de técnicas de construcción es una colección de dibujos y esquemas con reglas geométricas que persiguen alcanzar la estabilidad a partir de unas formas geométricas.

Los grandes maestros hacen modelos en madera que servían para la estética (proporción) pero no para la estática como comportamiento estructural .

Su gran conocimiento de la geometría, básico y profundo, les permite conseguir, junto con su sentido del oficio de "**colocación de las piedras**", que éstas estén siempre bajo la acción de la gravedad, trabajando a compresión y aprovechar así su gran resistencia y margen de seguridad y con ello quedar siempre muy por debajo de sus límites de resistencia.

La fuerza de la repetición, la forma empírica de los hechos (consumados en otras iglesias o inmuebles parecidos) es lo que los guiaba para levantar las estructuras de sus monumentos.

.....

## A MODO DE CONCLUSIONES ( Opción )

Espero sinceramente no haberos mareado mucho con todo lo que he querido transmitir hasta aquí. Invoco no obstante vuestra benevolencia ante la grave enfermedad de la piedra que sufre el autor de estas líneas, aún cuando no la tiene localizada en el riñón, como es habitual, sino en su cerebro. No extrañe pues que no estando satisfecho con las consideraciones expuestas a lo largo del escrito, todavía quiera hacer, a manera de conclusiones, unas **observaciones** críticas referidas a las construcciones medievales.

1ª.- Actualmente se analiza la cualidad de los edificios ya construidos, es decir, la realidad construida, siguiendo los conocimientos técnicos que tenemos hoy en forma de normativas, estudios, criterios de cálculo y otras. Podemos concluir que si las sigue o se ajusta a ellas, la construcción analizada ES BUENA y en caso contrario, NO ES BUENA o al menos es EXTRAÑA.

Es por ello que actualmente pensamos, siguiendo las Normativas Técnicas, que cuando un material de construcción rebasa sus límites de resistencia SE ROMPE. Por tanto, no cumple lo que nuestros cálculos nos señalan como valor aceptable de sus límites y debemos **rechazarlo** ( si podemos) o al menos , indicar que es **inaceptable**.

Pero en la realidad construida **no siempre que se superan los límites**, se ROMPE el material, con el consiguiente colapso ( sinónimo técnico de hundimiento o ruina) porque existen siempre unos ciertos márgenes de variabilidad en la capacidad resistente de los materiales, en especial de los materiales naturales o no fabricados, debidos a su heterogeneidad. Por ejemplo, puede darse el caso de que dos fragmentos de la misma roca pueden tener diferentes cualidades físicas tales como resistencia, porosidad, color u otras.

2ª.- Si nos pasamos al otro extremo , es decir, que comprobamos que el edificio está muy por debajo de sus límites de resistencia, no podemos por ello afirmar que ello sea una garantía de BUENA CALIDAD, porque el sobredimensionado sólo permite afirmar que el edificio NO SE CAE, al menos de momento... No podemos excluir la posibilidad de que el edificio sufra otros problemas constructivos tales como aparición de grandes humedades, importantes grietas o incluso, disposiciones constructivas defectuosas que también afecten a la estabilidad.

3ª .- Vista la actual falta de conocimientos detallados de las estructuras medievales, no sería lógico o al menos no sería razonable, que queramos valorarlos aplicándoles nuestros sistemas modernos de análisis del equilibrio.

Es más lógico hablar "**de hechos irrefutables y establecer unas consecuencias derivadas de ellos**" tal como afirma el profesor Castro Villalba en su Historia de la Construcción Medieval (Aportaciones) publicada por Ediciones UPC, Universidad Politécnica de Catalunya, al 1966.

Estos "hechos irrefutables" son, siguiendo el mismo orden en que el profesor Castro los relaciona, los siguientes:

- a) Los edificios medievales que hoy aún podemos ver **están en equilibrio**, porque sino habrían caído, lo cual no quiere decir que su esquema estructural sea racional según los conceptos modernos ni que cumpla las normas actuales.
- b) Las soluciones constructivas medievales son (en su origen) muchas y variadas. Incluso en el caso de edificios de parecidas dimensiones que han conseguido estados de equilibrio estable, no puede afirmarse que tengan una lógica

estructural actual. Seguramente un detallado estudio de su morfología nos descubriría la existencia de formas y técnicas diferentes, a pesar de que el resultado final ha sido igual de bueno.

- c) Todos los pesos de las cubiertas de estos edificios medievales (generalmente bóvedas de cañón hechas en piedra y reforzadas o no con arcos torales) **han de ir a parar a los muros de apoyo** por pura continuidad física. Las acciones de estos pesos “no van por el aire” sino por contacto entre materiales.
- d) Estos pesos generan **empujes que siempre se pueden descomponer en dos componentes, una vertical y una horizontal**. La dificultad para los constructores de todas las épocas es saber con certeza, **la magnitud y el punto de aplicación** de estos empujes. Dicho de otra manera más fácil de entender, saber cuantas toneladas pesan esas bóvedas y en que puntos de los soportes, sean muros o pilares, descargan estas toneladas.
- e) Históricamente, todo el esfuerzo de los constructores ha estado dirigido a conseguir que todos estos empujes estén **“contrarrestados”**, en especial, los empujes inclinados que son los que tienen más capacidad de desequilibrar las estructuras verticales. Es por ello que el ingenio de los constructores utiliza dispositivos o técnicas como las que se han descrito en la página 5 punto 2 de este escrito, siempre con la intención de que los pilares o los muros resistentes que “trabajan mal a flexión” bajo la acción de esos empujes inclinados, consigan conducir su componente vertical al cimiento pasando por su núcleo central, que es la parte capaz de resistir muy bien las compresiones.
- f) Esto nos explica en parte la utilización del **arco apuntado** el cual por su forma condice los empujes inclinados más cerca de la vertical y por tanto, con menores componentes horizontales, que son las que pueden hacer que vuelquen los pilares, columnas o muros.

.....

Para acabar, y a modo de conclusión final, nos atrevemos a afirmar que **los edificios románicos se aguantan porque consiguen aprovechar los muros gruesos de piedra para soportar las compresiones y contrarrestar los empujes inclinados, para que los pilares y columnas no sufran por las flexiones que aquellos empujes les producen .**

**JAUME MOYA I PLANA**  
Arquitecte