



**AXA**

UNA REVISTA DE ARTE Y ARQUITECTURA

**Juan Manuel Martínez-Osorio Chana**  
Ingeniero de Caminos, canales y puertos  
**M<sup>a</sup> Isabel Sardón de Taboada**  
Directora de Tesis

**Acercándonos al arco desde el  
cálculo vectorial**  
**Una reflexión desde sus orígenes**

**UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO**

Villanueva de la Cañada, MMXVII



© del texto: el autor.

Enero 2017

<https://www.uax.es/publicaciones/axa.htm>

© de la edición: *AxA. Una revista de arte y arquitectura*

Universidad Alfonso X el Sabio

28691 - Villanueva de la Cañada (Madrid)

Editor: Felipe Pérez-Somarriba - [axa@uax.es](mailto:axa@uax.es)

Co-editora: M<sup>a</sup> Isabel Sardón de Taboada . [msarddet@uax.es](mailto:msarddet@uax.es)

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo ni su almacenamiento o transmisión, ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista

Datos de Contacto del Autor: Escuela Politécnica Superior. UAX

Departamento. Ingeniería Civil

e-mail: [jmartoso@uax.es](mailto:jmartoso@uax.es)



**RESÚMEN:**

Se pretende analizar la génesis de los arcos por evolución de los elementos estructurales más básicos y sus características especiales en cuanto a su particular resistencia y a su idoneidad en la construcción de obras antiguas, particularizando en la construcción de bóvedas de puentes.

**PALABRAS CLAVE:**

Arco, Antifunicular, Obra de fábrica, Puentes históricos.

**ABSTRACT: (EN INGLÉS).**

It is intended to analyze the genesis of the arches by evolution of the most basic structural elements and their special characteristics in terms of their particular strength and suitability in the construction of ancient works, particularizing in the construction of vaults of bridges.

**KEY-WORDS: (EN INGLÉS).**

Arch, Antifunicular, Historic Bridges

**ÍNDICE:**

Introducción

Un poco de historia

El arco

**Funcionamiento estructural del arco. Antifunicularidad**

**Puentes de fábrica. Arcos de medio punto**

**Puentes de fábrica. Arcos ojivales**

**Bibliografía**



Uno de los grandes legados arquitectónicos de nuestro país reside en la existencia de un gran número de obras de fábrica desde los remotos tiempos de los romanos o incluso anteriores, que se conservan inalterables al paso del tiempo.

Nuestra obligación es conservarlas lo más inalteradas posibles y que puedan disfrutar de ellas las generaciones venideras. Es por ello, que nos interesa conocerlas al máximo para poder llevar a cabo este cometido, que, dicho sea de paso, en muchos casos no es tarea fácil.

En este artículo se plantea una revisión cronológica en la aparición y el empleo de los distintos elementos estructurales hasta la aparición del arco como solución a los diferentes problemas constructivos planteados y su idoneidad en los puentes de fábrica.

## Introducción

La obra de fábrica es el proceso constructivo más antiguo y más sólido que ha perdurado desde la antigüedad hasta nuestros días. Consiste básicamente en una acumulación de piedras con mayor o menor dificultad y gracia, que nos permite cerrar espacios o salvar vanos inconexos.

Esta acumulación de piedras es fruto de la capacidad humana de satisfacer una necesidad y gracias a su ingenio llevarla a cabo. En el libro «*Las grandes estructuras de los edificios históricos*» del Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción perteneciente a la Universidad de Sevilla, Felix Escrig apunta en el prólogo que “siempre se sintió sorprendido por la habilidad humana, dado que, en un primer intento, las culturas primitivas comenzaron amontonando piedras para delimitar espacios. Y no contentos con ello, se atrevieron a vivir dentro de ese montón de piedras donde además se sentían más seguros dentro de éstos que fuera”.

Para ello, debieron de ingeniárselas para primero amontonarlas, y segundo abrir vanos en su interior para utilizarlo como refugio. Y no contentos con eso, abrir también vanos en los muros para que entrase la luz en su interior y gozar de los beneficios de la luz.

Como vemos, el ingenio y las habilidades humanas siempre surgen de una necesidad, en este caso la de defenderse de las inclemencias meteorológicas y de las agresiones provenientes de cualquier depredador o vecino hostil guiado por la supervivencia. Esta necesidad y la falta de experiencias anteriores hace que, como todo, a partir de un comienzo muy rudimentario, vayan evolucionando y nos lleva a unas, cada vez, mejores y más elaboradas construcciones.

Pero no sólo la necesidad de protegerse, sino que también, la necesidad de conducir y almacenar agua, salvar acantilados, unir dos orillas ... El ingenio humano es capaz de buscar una solución que satisfaga sus necesidades para posteriormente



irla perfeccionando en función de las experiencias que vaya transmitiendo de una generación en otra.

Esta necesidad, siempre viene condicionada por la comunidad y por el entorno en el que se realiza. Es más, la obra que ha llegado hasta nosotros puede haber sido ampliada e incluso remodelada a lo largo de su historia e incluso construida en diferentes períodos históricos y consecuentemente con diferentes métodos de construcción e incluso de tipología.

Por todo ello, si queremos analizar las construcciones antiguas, debemos partir de una premisa fundamental y es que, cada una es diferente de otra y por ello no podemos considerarla como un ente aislado, sino que debemos tener en cuenta y unido indisolublemente a ella, el período o períodos en los que fue construida, su proceso de construcción y sus vicisitudes históricas a lo largo de su existencia.

La unión de todos estos elementos nos clarificará parte de su funcionamiento resistente y de su conservación a lo largo de tantos años con lo que, la posibilidad de cometer errores será menor, aunque el riesgo es grande.

Hoy en día, con los adelantos científicos con los que contamos y con el desarrollo del cálculo vectorial, es muy difícil ponerse en la piel de un maestro constructor de la antigüedad por lo que debemos matizar qué es lo que queremos evaluar.

Por un lado, está la evaluación del comportamiento estructural de las formas arquitectónicas que conforman la obra, arcos, bóvedas, muros, columnas, ... y otro diferente es su condición de equilibrio actual. Es decir, la dicotomía entre el cómo funciona estructuralmente la obra en su concepción y el por qué sigue resistiendo desde su construcción hasta la actualidad.

El paso del tiempo y el conjunto de cargas a las que va a ser sometida durante su vida útil influyen en sus condiciones resistentes, de manera que hay que tener claro que las distintas posibilidades de equilibrio de acuerdo con el número de coacciones que garantizan su estabilidad son muchas y variadas en función de su sustentación, de su tipología y de los materiales con las que está realizada. Es por ello que junto a las características particulares de construcción, debemos considerar todas las vicisitudes que ha sufrido a lo largo del tiempo y que han forjado su actual estado de equilibrio. De forma que la construcción adopta un estado que de entre todos los posibles, garantiza su estabilidad.

Este estado de equilibrio puede cambiar si cambian sus enlaces de sustentación o por la degradación de los materiales con los que ha sido construida. Por eso, la pervivencia de cualquier construcción se basa en que se mantengan sus características geométricas y de forma esenciales durante un período de tiempo.

Si nos paramos a observar cualquier construcción por humilde que sea, siempre subyace la pregunta... ¿cómo se sujeta? Y si se trata de una construcción histórica la

pregunta es aún más explícita... ¿cómo fue posible que con los medios existentes pudieran construirla?

La respuesta no es, en la mayoría de los casos una respuesta sencilla.

En cuanto al cómo, siempre nos apoyamos en los indicios que nos han llegado hasta la actualidad. Indicios basados en la observación y en la similitud con otras obras del mismo período y que guarden relación con ésta, ya que habitualmente, la documentación que se puede recabar sobre su construcción es escasa.

### Un poco de historia

El imperio romano, tan organizado desde su inicio y gran vertebrador del territorio, aún conserva referencias escritas que pueden darnos un poco más de luz al respecto, pero las posteriores épocas medievales y hasta el Renacimiento, la documentación en este aspecto es prácticamente inexistente.

Pero como en todo, siempre hay un principio.

Si retomamos la idea de que las construcciones responden a una necesidad, el primer elemento estructural del que podemos dejar constancia es el **muro**. Esa acumulación de piedras que nos permite protegernos, o mejor dicho permitió protegerse a nuestros antepasados, es un primer referente en cuanto a los elementos estructurales que sujetan nuestras obras. Que, si además ha perdurado en el tiempo, es porque estaba construido por materiales que han sido capaces de resistir a todos los avatares hasta nuestros días.

Así pues, y en un incipiente primer análisis, podemos afirmar que la obra de fábrica, entendiendo como tal la acumulación de piedras, es el proceso constructivo más antiguo, más sencillo y más resistente que ha perdurado hasta nuestros tiempos.

Si a este elemento estructural incipiente, le aderezamos con la habilidad humana, lo siguiente que se nos plantea es la necesidad de cubrir el espacio que delimita, a imagen y semejanza de las cuevas naturales con el fin de ganar confortabilidad. Surge de este modo y cronológicamente, un segundo elemento constructivo fundamental, **la cubierta**.

En un principio, la cubierta se resuelve mediante elementos no muy difíciles de conseguir ni de trabajarlos y con la longitud necesaria para que sean efectivos. Se emplearán, por tanto, elementos vegetales y maderas. Eso sí, no siempre con la eficacia de la esperada.

Pero estos elementos son en su gran mayoría perecederos o al menos muy degradables y en la mayoría de los casos poco impermeables. Con lo que de nuevo las necesidades nos llevan a plantearnos nuevos retos. ¿Por qué no intentar cubrir con materiales más inalterables y resistentes?

Aparecen, así, nuevas soluciones, a través del uso de materiales pétreos en la construcción de cubiertas. A la vista está que, con esta solución, el problema se complica.

A partir de aquí, se plantea el uso de elementos mucho más pesados y de menor longitud con el consiguiente problema de vencer a la gravedad realizando construcciones estables y que además nos solucionen el problema que queremos resolver, el de cubrir los recintos delimitados por los muros.

Nuevamente la habilidad humana encuentra una solución. Podemos disponer estos elementos pétreos, de tal manera que, apoyándolos sobre las hiladas de elementos apilados inferiores permitan, además de despejar la parte inferior de estos, posibiliten la apertura de vanos en el muro.

Surge así la figura de un nuevo elemento constructivo que nos permite obtener nuestro objetivo y que además que va a ser profusamente utilizado, **el dintel**. Que si además reforzamos los apoyos en los que se sustenta y los consideramos exentos al muro, aparecen simultáneamente **las columnas**.

Como vemos, poco a poco, se van superando los retos que se plantean ante la idea de la protección que supone un espacio estanco y cerrado donde se garantice la seguridad ante cualquier tipo de amenaza.

Pero como siempre, ante nuevas iniciativas, se plantean nuevos retos. ¿Cómo podemos cubrir los vanos si no disponemos de elementos pétreos con una longitud suficiente?

De esta manera aparecen las **falsas bóvedas**, o como Félix Escrig las denomina en su publicación a la que ya hemos hecho referencia, “cúpulas por avance de hiladas”.

Estas falsas bóvedas son realmente cubriciones construidas por materiales pétreos independientes que avanzan por voladizos sucesivos apoyadas unas sobre otras, trabajando estructuralmente como ménsulas y que llegan a cubrir el vano. (figura 1)

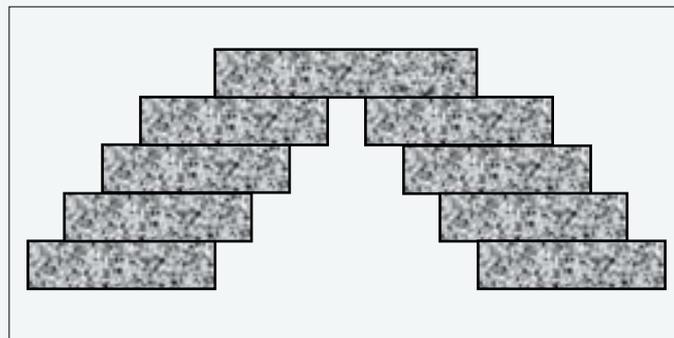


Figura 1. Falsa bóveda o cúpula por avance de hiladas. Elaboración propia

Esta es una solución ingeniosa, pero que, aunque la forma de su directriz sea no lineal, no puede considerarse como una cúpula propiamente dicha.

Reciben la denominación de falsas bóvedas por su forma abovedada (de cueva), pero conceptualmente no lo son, dado que, no funcionan estructuralmente como tales.

Para que ello suceda, toda la estructura debe funcionar como una única unidad, no como elementos independientes. Y para ello no debe estar sometida a flexión.

Pero aún, la habilidad humana es capaz de perfeccionar estos avances complicando las soluciones y resolviendo mejor el problema. Llegamos así a la aparición del **arco** y de la **bóveda**.

Eduardo Torroja en su obra «*Razón y ser de los tipos estructurales*» (obra de referencia para muchos técnicos de la construcción desde su publicación y en el que desmitifica el cálculo numérico de los elementos estructurales frente a la forma) publicado por primera vez en 1957 por el “Centro Superior de Investigaciones Científicas” nos afirma que “El arco es el mayor invento tensional del arte clásico ... Si la columna es arquitectura pura, el arco es ingeniería; o, mejor dicho -para alejar toda interpretación profesional-, si la columna es arte, el arco es técnica; sin querer esto decir, ni que a la columna le falte técnica, ni que el arco sea incapaz de vivísima expresión estética.”

## El arco

El arco nace, por tanto, como una evolución y como una alternativa a la columna y al dintel, presentando ventajas notables sobre éstos.

En primer lugar, el arco nos va a permitir salvar distancias mucho mayores que el dintel de piedra y, además, y, en segundo lugar, con elementos incluso más pequeños, si cabe.

Estos pequeños elementos pétreos se denominan dovelas y tienen forma de cuña. Pero a diferencia de los dinteles, para que actúen como una unidad deben estar todas correctamente colocadas.

Para su sustentación mientras el arco está en construcción precisan de una cimbra y, por tanto, no actuará como unidad hasta que no estén todas las dovelas correctamente colocadas y se retire ésta.

Esta ventaja, la de realizarse con materiales de dimensiones menores al vano que pretenden cubrir, nos permite salvar grandes distancias sin la necesidad de encontrar piezas de grandes dimensiones, pero eso sí, como vemos, introduce la necesidad del empleo de la cimbra durante su construcción, lo hace que el proceso sea más complejo y costoso.

Por su propia morfología, las dovelas que conforman en arco están sometidas fundamentalmente a esfuerzos de compresión y, por lo tanto, para su sustentación transmiten empujes horizontales en los puntos de apoyo hacia el exterior, con lo que tienden a provocar la separación de éstos.

Estos empujes horizontales son los que debemos contrarrestar mediante el uso de contrafuertes o arbotantes (tal y como sucede en las naves de las iglesias), muros de suficiente masa u otros arcos (como es en el caso de los puentes y de los acueductos).

Es importante incidir de nuevo, como ya hemos apuntado, que cualquier estructura curva no puede considerarse como un arco, ya que para que esto ocurra las dovelas deben comportarse estructuralmente para lo que han sido concebidas, es decir, deben resistir por compresión, eliminando la flexión del arco. Flexión que, en el caso de aparecer, le llevaría con toda seguridad a la ruina.



*Ilustración 2. Arcos del acueducto de Segovia. Donde se pueden apreciar las dovelas que conforman el arco de fábrica.*

## Funcionamiento estructural del arco

Técnicamente, por tanto, el arco es un sistema en equilibrio que para que funcione estructuralmente como tal debe ser antifunicular de cargas, ya que, si no actuará como una viga de directriz curva, y no como un arco.

La **antifunicularidad** se refiere a la geometría que debe adoptar una estructura para que las cargas que sobre ella actúan no generen esfuerzos de flexión. Nos indica, por tanto, la forma de trabajo de la estructura y nos garantiza que toda ella va a trabajar con esfuerzos de compresión con lo que el aprovechamiento del material será mayor.

Podemos entender, por tanto, y para ser más precisos, la antifunicularidad como un estado de equilibrio que nos relaciona la forma de la estructura con las cargas que debe resistir. Lo que en obras de fábrica antiguas no es muy difícil de conseguir ya que prácticamente el total de las cargas que debe resistir la estructura son debidas al peso propio, y las cargas móviles (sobrecargas de uso), en el caso de que las haya, eran totalmente despreciables frente a las anteriores.

Además, si en el arco el trabajo de compresión es fundamental, los materiales pétreos empleados cubren con creces esta necesidad.

Vamos a detenernos a explicar este concepto de antifunicularidad más afondo y con algunos ejemplos ilustrativos:

El primer concepto que debemos entender es el de que toda la estructura debe ser capaz de trabajar a compresión. Para ello, pensemos en un grupo de elementos pequeños pétreos más o menos regulares a los que no une ningún tipo de ligante. Si los situamos alineados y aplicamos en sus extremos fuerzas de compresión, seremos capaces de izarlos desde una superficie de apoyo y mantenerlos unidos únicamente por el efecto de la compresión. (figura 2)



*Figura 2. Elemento sometido a compresión. Elaboración propia*

El problema estriba en que para que sea resistente debemos mantener constante las fuerzas de presión, e incluso incrementarlas si decidimos situar cargas sobre su superficie exterior.

Como podemos apreciar, este ejemplo nos ilustra desde el punto de vista de que las fuerzas se transmiten de un elemento a otro a lo largo de la directriz de la estructura, entendiendo como directriz la línea imaginaria que une los centros de gravedad de todas las piezas que conforman esta estructura.

Este es el objetivo que perseguimos, vencer la tendencia natural de caer por la acción que ejerce la gravedad únicamente por acción de fuerzas de compresión.

Si ahora, evolucionamos la estructura y la consideramos formada por dos puntales formando una "V" invertida. Para que se produzca el mismo efecto que el descrito anteriormente cargamos a esta estructura con una carga puntual y vertical en el punto de confluencia de los dos puntales. (figura 3)

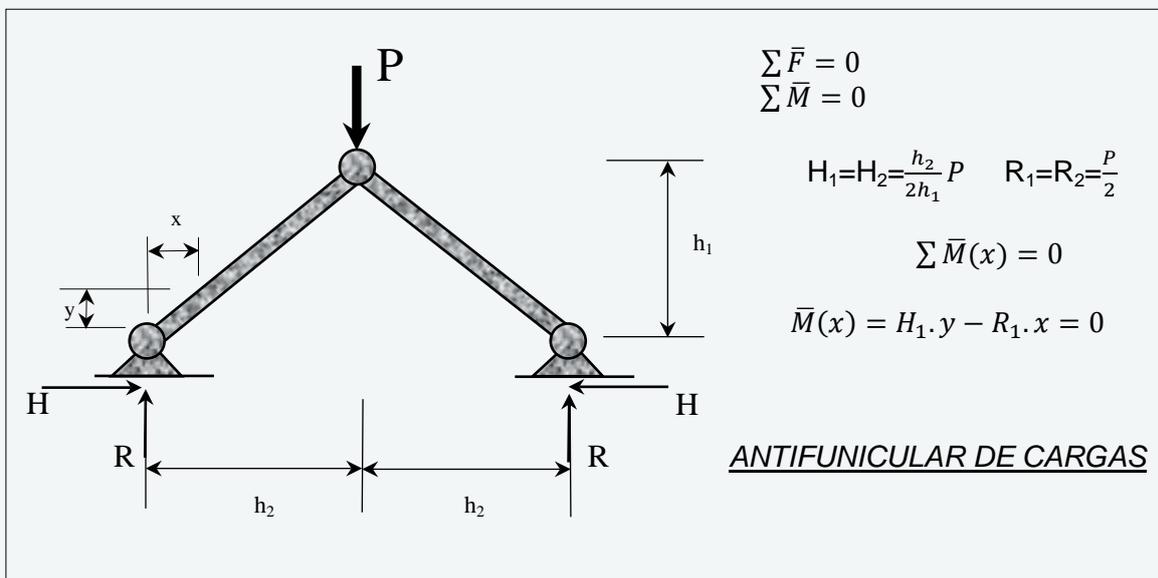


Figura 3. Elemento sometido a compresión. Elaboración propia

En este caso, los esfuerzos (entendiendo por esfuerzo las fuerzas de cohesión del material que constituye las barras) son conducidos siguiendo también la directriz de las barras hacia los elementos de sustentación y no generando flexión en la estructura.

Si ahora, en tercer lugar, consideramos estructura de la figura 4, vemos que ocurre el mismo efecto que en las dos anteriores, las fuerzas de cohesión son canalizadas siguiendo la directriz de la estructura hacia los apoyos que la sustentan.

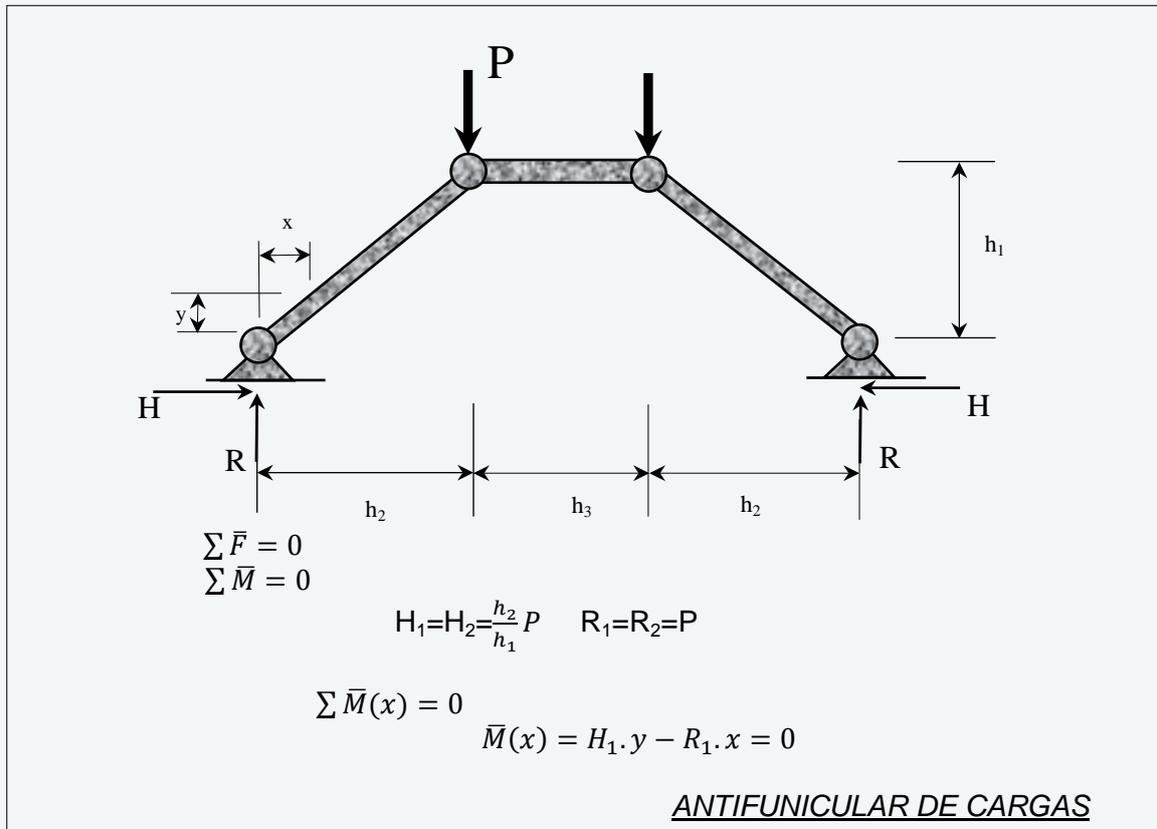


Figura 4. Elemento sometido a compresión. Elaboración propia

Estas estructuras utilizadas como ejemplos para la comprensión de este concepto, no han sido elegidas caprichosamente, sino que se corresponden con las imágenes especulares de las que tendríamos si consideráramos un cable sustentado por sus dos extremos de longitud mayor que la separación entre éstos y con cargas puntuales situadas simétricamente en los puntos señalados con respecto del eje central de simetría. Éstas cargas producirían en el cable un cambio en la directriz del mismo y que la cuerda trabajase a tracción al tensarse.

A esta forma que adopta la cuerda se le denomina “**funicular de cargas**” y a los ejemplos considerados anteriormente reciben, por tanto, el nombre de “**antifunicular de cargas**” es decir, en oposición al funicular de cargas.

Es importante reseñar que tal y como hemos expuesto, el efecto de la antifunicularidad no sólo depende de la forma de la estructura sino también de las cargas que sobre ella gravitan. Por lo que un cambio en las cargas o en la sustentación de la estructura haría que variara su comportamiento resistente y por tanto un posible colapso de la estructura.

Por todo ello, y en función del apoyo matemático aportado a esta explicación, que desconocían los constructores de las obras históricas, a la vista está que los cons-

tructores antiguos no solo dominaban el arte de construir, sino que fundamentalmente dominaban la forma, la tipología y los materiales con los que contaban.

Si, por último, generalizamos el problema con infinitos tramos e infinitas cargas actuando a lo largo de toda la directriz, llegamos al concepto mecánico de arco y a su antifunicular de cargas (figura 5)

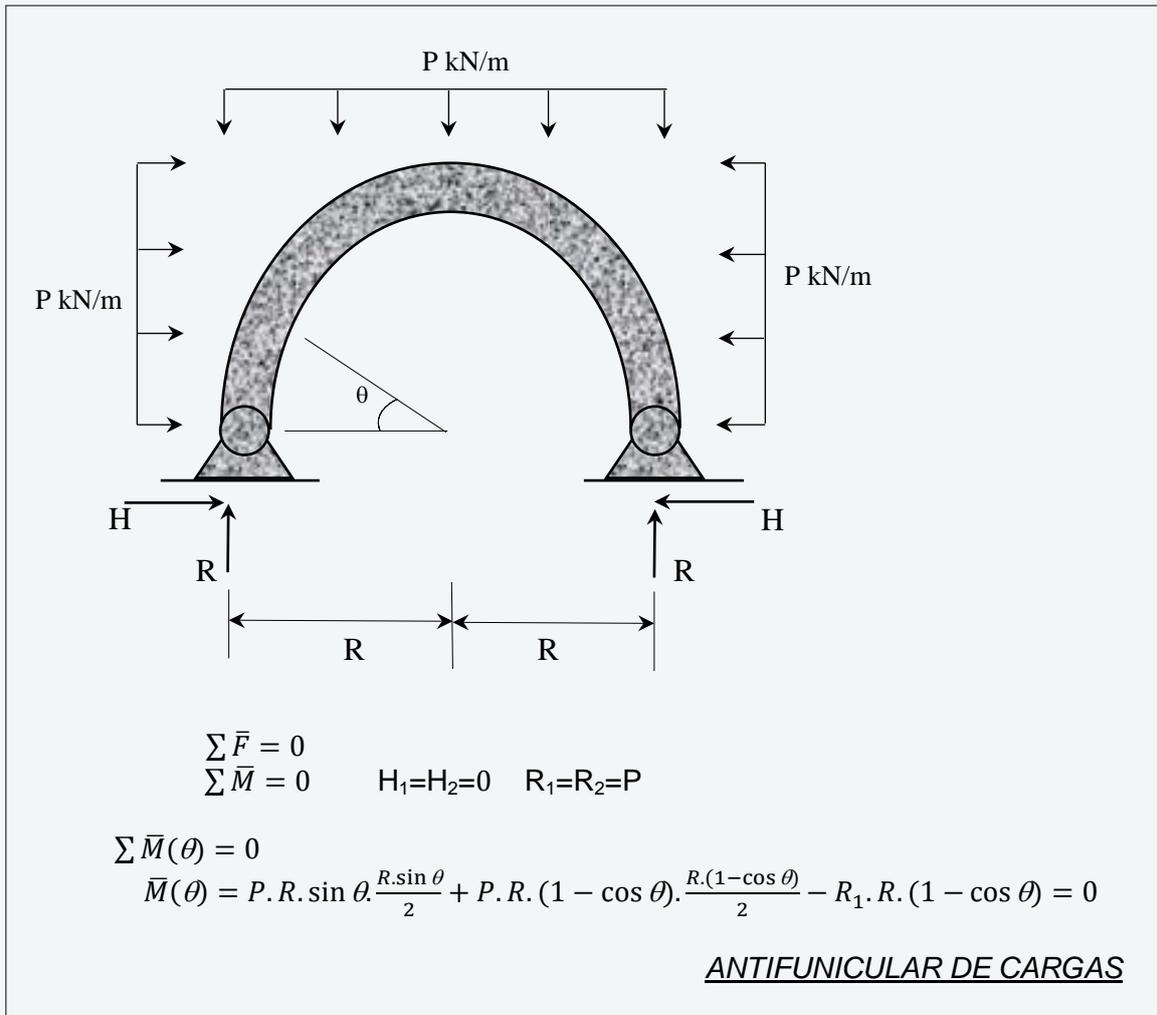


Figura 5. Arco circular sometido a compresión. Antifunicular de cargas. Elaboración propia

Una vez definido el aspecto resistente del arco, si nos paramos a analizar la respuesta resistente del mismo a las acciones exteriores, los empujes laterales en la unión del arco con sus elementos de sustentación (cimentación) fundamentales para su funcionamiento estructural, alcanzan su mayor valor en estos puntos. Lo que nos indica que en un arco semicircular las zonas próximas a estos enlaces de sustentación, denominadas zonas de arranque, estructuralmente hablando no tienen gran utilidad, por lo que para optimizar aún más la capacidad resistente del arco podemos eliminar estas

zonas rebajando el arco. Es decir, podemos disminuir la relación entre la flecha y la longitud del vano ( $f/L$ ).

Desde un punto de vista estructural, a menor relación  $f/L$  donde  $f$  es la flecha del arco, entendiendo como tal la distancia entre la clave del arco (el punto de tangente horizontal) y  $L$  la luz libre del mismo, la componente horizontal que necesita el arco para ser estable tiende a ser mayor. Por lo que cuanto más se rebaje un arco, mayor fuerza horizontal aparecerá en los apoyos con lo que exige una mayor reacción del terreno. Esto implica que cuanto más rebajado sea un arco debemos exigir una mayor definición en el tallado de las dovelas y una cimbra más cuidada ya que cuanto mayor sea el rebajamiento del mismo, la única colaboración resistente entre dovelas es la forma de éste.

El arco, la bóveda y la cúpula son, por tanto, las únicas tipologías estructurales que permiten salvar luces importantes utilizando materiales pétreos de un tamaño menor que la luz que tienen que salvar.

A la vista está, con el patrimonio histórico que ha perdurado hasta nuestros días, que su empleo ha sido el más adecuado a lo largo de la historia ya que, esta tipología es capaz de mantener estables las cargas que sobre ella gravitan. Donde la principal y casi única, en comparación con el resto, es el peso propio.

Pero los constructores romanos y los románicos y góticos del medievo, anteriores al Renacimiento, que es cuando se empieza a desarrollar estudios acerca de la gravedad y sobre el equilibrio, nada sabían sobre cálculo vectorial, equilibrio estático ni sobre antifunicularidad. El desarrollo de los arcos y de las bóvedas a lo largo de los siglos ha contado con diferente suerte.

Los romanos contaban con tratados de arquitectura de referencia donde la forma estructural constituía el elemento fundamental de construcción y en base a ellos se realizaban las construcciones.

Posteriormente, tanto los constructores románicos como góticos de la Edad Media, heredan los conocimientos romanos, pero desarrollan su labor constructiva en un periodo de oscurantismo donde los conocimientos se transmiten oralmente de maestros a aprendices dentro de los denominados gremios profesionales de los constructores.

### **Puentes de fábrica. Arcos de medio punto**

La mayoría de los puentes de fábrica mantienen una génesis romana y se pueden considerar como una continuación de sus enseñanzas. En los que el arco y la bóveda de medio punto es elemento estructural básico.

Esta es la razón de que muchos de los puentes históricos que se conservan se consideren romanos, aunque fueran totalmente reconstruidos a partir de sus cimientos, si es que quedaba algo más de ellos, y correspondan a períodos posteriores.

Todos los puentes de piedra, generalmente están constituidos por dos elementos básicos, el arco y la calzada, el primero les garantiza la estabilidad estructural y el segundo la finalidad del mismo como carga muerta.

Para transmitir las cargas desde la calzada hasta el arco, se realizaban rellenos de tierra que eran contenidos lateralmente mediante muros de mampostería.

Si la primera función de una obra de fábrica es sostenerse a sí misma, en su concepción, los puentes romanos o los puentes medievales basaban todo su comportamiento resistente en su forma y en los materiales con los que fueron construidos.

En ellos, el peso propio es muy superior al de cualquier sobrecarga que debieran soportar por lo que su principal función estructural era la de sujetarse a sí mismo. Es por ello que la durabilidad del puente haya estado íntimamente ligada a la de los materiales y al uso que se le haya dado al mismo.

El dimensionamiento de todos estos elementos, se realizaba empíricamente, es decir mediante métodos de prueba y error. Y no es hasta el Renacimiento y durante los siglos XVII y XVIII posteriores cuando comienzan a desarrollarse métodos más precisos. En el año 1695, Lahire, miembro de la Academia de Ciencias Francesa, en su «*Traté de Méchanique*» aplicó por primera vez el concepto del polígono de fuerzas en las bóvedas de medio punto y en él afirma la imposibilidad de lograr un equilibrio perfecto si las dovelas de arranque son ortogonales al paramento sobre el que se asienta.

Es por esto que un arco o una bóveda de medio punto en su arranque y en dirección vertical nunca podrá aproximarse a la línea de presión, que es la curva ideal que dibujan las fuerzas internas que unas dovelas transmiten a las adyacentes y que representa el trazado óptimo de un arco o de una bóveda. Por eso, los arcos romanos van acompañados de muros y rellenos lo suficientemente importantes para resolver sus problemas de estabilidad.

Todo este razonamiento se traduce en que, en un arco semicircular las zonas de arranque de los arcos no tienen gran utilidad y por ello, podemos rebajar el arco. Es decir, podemos disminuir la relación entre la flecha y la longitud del vano ( $f/L$ ).

Desde un punto de vista estructural, a menor relación  $f/L$ , la componente horizontal que necesita el arco para ser estable tiende a ser mayor. Por lo que cuanto más se rebaje un arco, mayor fuerza horizontal aparecerá en los apoyos. Lo que exige una mayor reacción del terreno.

Esto implica, como ya expusimos con anterioridad, que cuanto más rebajado sea un arco debemos exigir una mayor definición en el tallado de las dovelas y una cimbra más cuidada ya que cuanto mayor sea el rebajamiento del mismo, la única colaboración resistente entre dovelas es la forma de éste.

Además, es importante hacer mención de que los ingenieros romanos construían los puentes de fábrica arco a arco. De esta manera durante la construcción del puente, existía una situación de desequilibrio en el empuje lateral de la bóveda que no estaba compensada con el vano siguiente. Esto justifica unos espesores de pila muy despro-

porcionados con relación al peso que debían soportar y por tanto así, garantizaban la antifunicularidad del mismo y su situación de equilibrio.

Estos espesores de las pilas de los puentes romanos, oscilan entre 1/2 y 1/3 de la luz libre del arco, lo que justifica que los empujes no constituían ningún problema resistente al vuelco.

Con el avanzar de los siglos y con la descentralización que supuso la caída del Imperio Romano, muchos de los puentes dejaron de cumplir la función para las que fueron construidos, y por falta de conservación se fueron abandonando. Y no es hasta la Edad Media con el comienzo de los desplazamientos de la población debido las peregrinaciones cuando vuelven a tomar importancia las infraestructuras y los puentes a fin de fomentar el desplazamiento y una nueva pero muy rudimentaria vertebración del territorio a través de las comunicaciones.

### Puentes de fábrica. Arcos ojivales

Los arcos de los puentes medievales, como continuación de los romanos, suelen ser de medio punto durante la época Románica y hasta mediados de la Edad Media, que es cuando rompe el estilo gótico con toda su grandiosidad.

Las novedades de la arquitectura gótica supusieron una evolución muy notable en el mundo de la construcción, sobre todo en la arquitectura religiosa ya que supuso un especial énfasis en la ligereza estructural y en la iluminación del interior de las construcciones.

Estructuralmente hablando, supuso la introducción generalizada el arco apuntado (ojival) y de la bóveda de crucería, cuyos empujes, más verticales que en el arco de medio punto permitían una altura superior y una mejor redistribución de las cargas. Unido a ellos, y para lograr la estabilidad de las construcciones, se introduce otro elemento igual de representativo en este tipo de arquitectura como es el arbotante. Su misión, meramente estructural, es la de transmitir las cargas provenientes de las cubiertas a una serie de contrafuertes exteriores que garantizan la estabilidad del edificio. De esta manera se libera a los muros de cierre, en parte, de su función sustentante, confiándola ésta a grandes pilares y pudiéndolos así dotar de grandes vanos para favorecer la iluminación interior.

Pero esta mejora técnica en los edificios no se traduce de igual manera en los puentes donde prima el aspecto funcional del mismo frente al estético.

La introducción del arco apuntado en los puentes, al contrario que en las grandes construcciones góticas, no aporta ninguna mejora estructural frente al arco de medio punto ya que su característica forma apuntada en la clave nos obliga a que, para lograr la antifunicularidad de las cargas debemos aportar una carga puntual adicional en ella y así logremos que trabaje sólo por compresión.

Esto nos lleva a un peor aprovechamiento resistente de los materiales y a un ensanchamiento de las pilas del puente para lograr su estabilidad lo que lleva aparejado un peor comportamiento estructural ante las cargas que debe soportar.

Si consideramos, además, sobrecargas de uso móviles y las situamos sobre uno de los costados del arco, éstas crean una inestabilidad que tienden a abrirlo por la clave y por lo tanto ponen en riesgo su estabilidad.

Bien es verdad, que cuando este tipo de arcos fueron introducidos en la construcción de puentes, las sobrecargas móviles eran insignificantes con relación al peso propio del puente y por tanto no tenían ninguna notoriedad, pero nos permite desaconsejar su respuesta estructural en los puentes, y justificar de esta manera que las mejoras que supuso en la arquitectura la introducción del arco ojival, no fue tal en la respuesta estructural del mismo ante otro tipo de obras de fábrica.



*Ilustración 3. Puente del diablo. Martorell (Barcelona). Fotoarafia de Charles Clifford (1860-61)*

También, aunque en un estado inferior en cuanto a importancia, a nivel funcional este tipo de arcos presenta también sus deficiencias, ya que, aunque nos permite cubrir mayores luces que el de medio punto, su típica fisonomía en forma de lomo de asno incrementa las pendientes y la consiguiente incomodidad que ello conlleva para el uso del mismo por parte de la población, que a fin de cuentas son los usuarios de éstos.

Como vemos, y desde que iniciamos el caminar histórico para justificar la aparición de los arcos y su proliferación en las distintas construcciones del mundo antiguo siempre ha estado presente el dominio de la forma por parte de los constructores antiguos y el desconocimiento de los métodos modernos de cálculo estructural.

Ya Vitrubio aproximadamente en el siglo 25 a.C. afirmó en tratado «*De architectura*» recogido en diez libros que la arquitectura debe proporcionar utilidad, esbeltez y belleza. Y la optimización del uso de las formas contribuyó a la estabilidad de las construcciones.

El problema estriba, como planteamos al desarrollar este artículo, en querer analizar las construcciones antiguas desde nuestro “moderno” punto de vista con los conocimientos actuales y desligarlas de su contexto, de su entorno y de sus vicisitudes históricas.

Por lo que hoy en día con todos los adelantos técnicos y científicos que poseemos en comparación con el período en el que fueron concebidas y construidas es muy difícil ponerse en la piel del maestro constructor que hizo posible la construcción de aquellas obras. La pregunta debería ser, por tanto, si las obras, están bien calculadas o están bien diseñadas.

Como hemos podido apreciar, el conocimiento técnico que poseían era muy avanzado, aunque sin una base científica como se conoce en la actualidad que lo respaldase. Construían por necesidad y si problemas de rentabilidad monetaria, lo que no quiere decir que siempre obtuvieran el resultado deseado. Pero si, que eran capaces de aprender y evolucionar ante nuevos retos y a partir de la experiencia acumulada.

Como conclusión a todo lo expuesto, podemos volver a hacer referencia a Eduardo Torroja y a su obra «*Razón y ser de los hechos estructurales*» que en el capítulo del planteamiento general del problema, apunta que “Las teorías rara vez dan más de una comprobación de la bondad o del desacierto de las fórmulas y proporciones que se imaginan para la obra. Éstas han de surgir primero de un fondo intuitivo de los fenómenos que han quedado como un poso ínfimo de estudios y experiencias a lo largo de la vida profesional”... “El cálculo no es más que una herramienta para prever si las formas y dimensiones de una construcción, simplemente imaginada o ya realizada, son aptas para soportar las cargas a que ha de estar sometida”.

## Bibliografía

AGUILÓ, Miguel. ( 2 0 0 8 ) *Forma y tipo en el arte de construir puentes. Abada editores. Lecturas de ingeniería.* ISBN 978-84-96775-26-8

ARENAS DE PABLO, J.J. (1997) *Apuntes del curso "Las grandes bóvedas hispanas". Madrid 19 al 23 de mayo de 1997. Los Puentes*

ESCRIG PALLARÉS, Félix. (1997) *Las grandes estructuras de los edificios históricos. Universidad de Sevilla.* ISBN 84-88988-17-6

ESCRIG PALLARÉS, Félix. ( 2 0 0 4 ) *La modernidad del gótico. Seis puntos de vista sobre la arquitectura medieval. Universidad de Sevilla.* ISBN 84-472-0837-0

FERNÁNDEZ CASADO, Carlos. (1955) *Cálculo de arcos. Editorial Dossat Madrid.* 1955

FERNÁNDEZ CASADO, Carlos. (2008) *Historia del puente en España. Puentes romanos. Colegio de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.* ISBN 84-38-00-409-1

HUERTA, Santiago. (2004) *Arcos, Bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de arquitectura de Madrid.* ISBN 84-9728-129-2

MAS-GUINDAL LAFARGA, Antonio José. (2011) *Mecánica de las estructuras antiguas, o cuando las estructuras no se calculaban. Editorial Munilla-Lería.* ISBN 978-84-89150-90-4

PAVÓN MALDONADO, Basilio. (1990) *Tratado de arquitectura hispanomusulmana. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.* ISBN 84-00-07070-4

RIBERA, José Eugenio. (1934) *Puentes de fábrica y hormigón armado. Tomo 3, Anteproyectos y puentes de fábrica. Talleres gráficos Herrera.* 1934

ROTH, LELAND M. (2000) *Entender de arquitectura. Sus elementos, historia y significado. Editorial Gustavo Gili.* ISBN 84-252-1700-8

TORROJA, Eduardo. (2007) *Razón y ser de los tipos estructurales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.* ISBN 84-00-05745-7

VITRUVIO. (1974) *Los diez libros de arquitectura. La arquitectura técnica en sus textos históricos. Edición facsímil. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos.*