



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# Evolución Histórica del ARCO como Elemento Estructural en Arquitectura

<b>Apellidos, nombre</b>	Arianna Guardiola Villora (aguardio@mes.upv.es) Luisa Basset Salom (lbasset@mes.upv.es)
<b>Departamento</b>	Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
<b>Centro</b>	Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universidad Politécnica de Valencia



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



## 1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se presenta el funcionamiento y la evolución histórica de uno de los elementos estructurales más utilizados a lo largo de la historia: el arco.

## 2 Introducción

El arco es uno de los elementos estructurales que más curiosidad ha despertado a lo largo de la historia de la arquitectura, siendo el único elemento estructural de la antigüedad que permitía abrir huecos en los muros y cubrir grandes luces con ladrillos o mampostería.

Su uso se remonta a las primeras civilizaciones, siendo los romanos los que lo empezaron utilizar extensivamente en la obra civil, perfeccionando de tal modo la técnica de construcción que aún hoy en día se mantienen en pie numerosos ejemplos.

Por otro lado, los primeros intentos de comprender su funcionamiento y de establecer unas reglas de dimensionado los encontramos en los manuscritos de Leonardo da Vinci, en los que se intuye el intento de calcular la fuerza horizontal en los estribos. La solución a este problema, junto con las teorías que intentan establecer la forma y grosor ideal del arco serán objeto de estudio de numerosos científicos y arquitectos a lo largo de los siglos.

La evolución a lo largo de la historia del arco como elemento estructural fundamental, se basa en el uso de los materiales disponibles, la utilización de nuevas herramientas, el perfeccionamiento de la técnica constructiva y la comprensión de su comportamiento estructural.

## 3 Objetivos

El alumno, a lo largo de la lectura de este documento, analizará la evolución histórica del arco como elemento estructural básico, entendiendo las posibilidades que los distintos materiales han ofrecido a lo largo de la historia y las teorías en las que se ha basado su dimensionado, para concluir en algunas de las realizaciones del siglo XX.

## 4 El arco como elemento estructural

### 4.1 Comportamiento del arco

El arco es un elemento estructural lineal de directriz curva que permite salvar una luz o abrir un hueco en un muro. Cuando el arco es de piedra o ladrillo, las piezas que lo forman reciben el nombre de dovelas, y los elementos sobre los que apoya el arco y reciben la carga del mismo se llaman estribos (*figura 1*)

Los elementos del arco trabajan básicamente a compresión, transmitiéndose las fuerzas de dovela en dovela dando lugar al polígono de cargas. Esta línea de



transmisión de cargas se corresponde con lo que llamamos antifunicular, es decir, la inversa de la forma que adoptaría un cable del que cuelgan las cargas a transmitir por el arco. La forma del antifunicular depende de las cargas a transmitir. Así, una carga constante uniformemente repartida adopta la forma de una catenaria, mientras que la carga que debe soportar el arco que se utiliza para abrir un hueco en un muro adopta una forma cercana a la parábola.

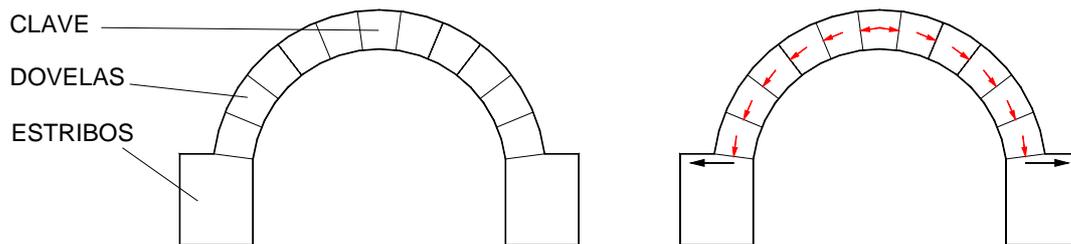


Figura 1

Los principales problemas en el dimensionado del arco son:

1. Definir la directriz del mismo de modo que se ajuste lo más posible al antifunicular de cargas, garantizando que todas las piezas están comprimidas, y que no se producen esfuerzos de flexión.
2. Dimensionado de los estribos para aguantar la carga horizontal. A veces, estos estribos sufren un pequeño movimiento provocando el reajuste de las dovelas del arco. Una manera de evitar este movimiento es atirantar el arco para evitar que éste se abra.

## 4.2 Arcos de la naturaleza

No es inusual encontrar en la naturaleza arcos en piedras y rocas. Estos arcos son generados por los agentes meteorológicos, que erosionan parte de la roca en la que se forman, manteniéndose estables siempre que la línea de empujes quede contenida en el grosor del mismo. Ejemplos de este tipo de arcos podemos ver en las imágenes de la *figura 2*.



Figura 2

### 4.3 Arcos construidos

Los primeros arcos debieron construirse sobre el 4000 a.C. con ladrillos secados al sol (no cocidos) en Mesopotamia. Los egipcios utilizarían la misma técnica unos siglos más tarde, siendo posible ver arcos y falsos arcos en las galerías interiores de las pirámides. No es, sin embargo uno de los elementos estructurales representativos de estas civilizaciones. Un ejemplo de arco egipcio se puede ver en la *figura 3*.

El falso arco es aquel elemento de forma similar al arco pero cuyo funcionamiento no corresponde con el de los arcos (las dovelas comprimidas) sino que los ladrillos están funcionando como pequeñas ménsulas, una sobre otra. Este tipo de arcos no necesita cimbra -armazón de madera construido para sostener las dovelas durante su construcción- ya que son autoportantes desde el inicio. (*figura 4*)

Otro ejemplo de arco de esta primera época sería el de la puerta de Ishtar, (*figura 5*) una de las 8 puertas de la muralla interior de Babilonia (de 575 a.C. se puede visitar en el museo de Pérgamo en Berlin). Este arco de medio punto y 10 metros de luz está construido con ladrillos vidriados en color azul.

Sin embargo, serán los romanos, herederos de los etruscos del arte de tallar las piedras en forma de cuñas, los que utilicen el arco masivamente. La generalización del arco en el imperio romano abrió posibilidades hasta ese momento desconocidas en las obras de arquitectura e ingeniería, siendo numerosas las construcciones de arcos romanos que han llegado hasta nuestros días. Sirva como ejemplo los arcos del Coliseo Romano en Roma, obra del Siglo I d.C. de la *figura 6*.



Figura 3



Figura 4



Figura 5



Figura 6

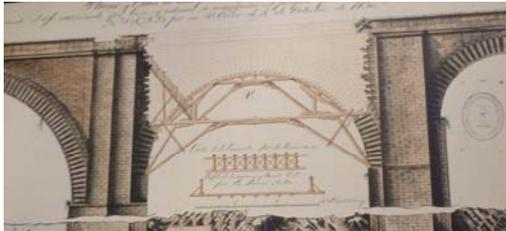
Por otro lado, pesar de que los romanos utilizaron el arco masivamente, no hay constancia de que desarrollaran ninguna teoría sobre el dimensionado del mismo.

Así pues, Vitruvio (s.I a.C.) estudioso romano de las obras de la Antigüedad y autor del tratado "Los diez libros de Arquitectura" dice que para abrir un hueco en un muro para una puerta o ventana, "*debemos descargar los muros por medio de arcos compuestos de dovelas cuyas juntas converjan hacia su centro*", pero no añade más datos.

Casi todos los arcos romanos son arcos de medio punto (media circunferencia), de modo que las juntas entre dovelas convergen en el centro del círculo, siendo las juntas radios del círculo. Diversos autores sugieren que el término cimbra, derive de la palabra centro.



El arco necesita de la cimbra hasta que se coloca la clave, o pieza angular, de la que depende la estabilidad del arco. En el plano de reconstrucción de uno de los arcos del puente de Alcántara (1831) se puede ver un dibujo de la cimbra utilizada (*figura 7*) y en la *figura 8* un modelo en miniatura de la misma.



*Figura 7*



*Figura 8*

Según cuenta el profesor Heymann, la práctica y teoría de la construcción de puentes llegó a adquirir en Roma rango de institución religiosa – Collegium Pontifices. Institución que sobreviviría a los tiempos oscuros de la Edad Media, resurgiendo en el s. XII como los Frères Pontifices Benedictinos, y es que no hay que olvidar que la construcción de un puente podía cambiar la forma de vida de una población, constituyendo en algunos casos una importante fuente de ingresos.

La única manera de construir un puente de piedra, es construir uno o varios arcos sobre los que colocar el tablero. El reto que suponía construir un puente de estas características en la Edad Media es descrito por el autor británico Ken Follet en la novela "Un mundo sin fin".

En la Baja Edad Media impera el estilo Románico, en el que se siguen construyendo arcos de medio punto como los de las *figuras 9* y *10*, siendo en la Alta Edad Media cuando los constructores góticos apunten el arco. Con esta nueva forma, además de subrayar la verticalidad del arco, los empujes en los estribos son menores. En las *figuras 11*, *12* y *13* se muestran varios ejemplos de arcos góticos.



*Figura 9*



*figura 10*



*Figura 11*



*Figura 12*



*Figura 13*

Los constructores góticos desarrollaron un conocimiento intuitivo importante de la distribución de las fuerzas. Tampoco en este caso hay constancia de tratados o manuales de construcción de esta época. Posiblemente los secretos de los maestros canteros se transmitieran oralmente entre los miembros de la logia.

El único documento de la Edad Media que ha llegado a nuestros días es el cuaderno de viajes de Villard de Honnecourt (Livre de portraiture) escrito entre 1220 y 1240 en el que se recoge una serie de imágenes relacionadas con la construcción en las que se muestran las herramientas utilizadas y los procesos constructivos de la época.

En la *figura 14* se recogen tres de las 250 láminas que se conservan en la Bibliothèque Nationale de Paris.

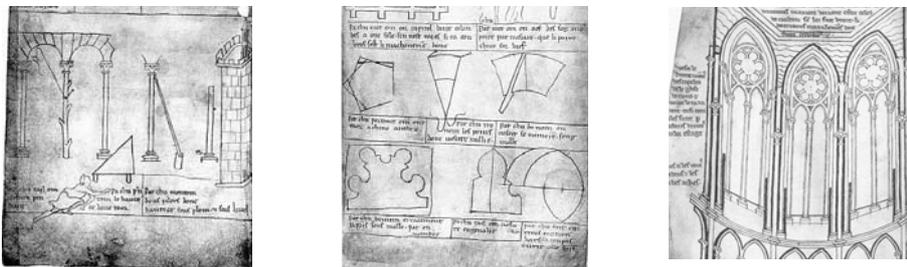


Figura 14

En ellas se puede ver el proceso constructivo de un arco pinjante, una serie de geometrías caprichosas de arcos polilobulados, arcos de herradura y arcos góticos apuntados.

El proceso de construcción de los arcos no era trivial. Los canteros debían replantear el mismo en el suelo, tallando todas las piedras para que encajaran perfectamente garantizando la estabilidad del mismo. Las imágenes de la *figura 15* corresponden a una maqueta en la que se recrea el proceso constructivo de la Catedral inglesa de Salisbury.



Figura 15

## 4.4 Las teorías

El Renacimiento (siglo XV-XVI) traerá consigo las primeras teorías científicas.

Leonardo Da Vinci (1452-1519) escribió " *el arco no es más que una fuerza causada por dos debilidades: en efecto, el arco en los edificios está compuesto por dos cuartos de círculo, y cada una de ellos, débil por sí mismo, desea caer, pero oponiéndose cada uno a la ruina del otro, las dos debilidades se transforman en una sola fuerza... los cuartos se empujan mutuamente*" (añadiendo que dichos





En 1675 Robert Hooke escribió un anagrama en latín indicando que había encontrado *"la verdadera forma, matemática y mecánica de todos los tipos de arcos en los edificios, con el adecuado contrarresto necesario para cada uno de ellos"*. Murió antes de descifrarlo, siendo su albacea el que en 1705 dio a conocer la solución; *"Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum"* que significa *"Como cuelga un cable flexible, así invertidas, se mantienen las piezas de un arco."* y hace referencia a la relación que existe entre la catenaria y la forma del arco.

Sobre esta misma idea publicará David Gregory en 1697 un análisis sobre el funcionamiento de los arcos, concluyendo que *"La verdadera y legitima forma de un arco o fórnix no es otra que la catenaria, y cuando un arco de cualquier otra forma se sostiene es porque hay alguna catenaria contenida en su espesor"*

La primera aplicación de la estática a la solución de problemas de arco se debe a La Hire (1640-1718) Por primera vez se utiliza el polígono funicular para analizar el comportamiento del arco. En su *"Tratado de Mecánica"* (1695) calcula geoméricamente los pesos que deberían tener las dovelas del arco para asegurar su estabilidad.

Coulomb (1736-1806) progresó más allá en la teoría de arcos, determinando los límites superiores e inferiores del empuje necesario para garantizar su estabilidad. A finales del siglo XVIII se llevaron a cabo numerosos ensayos con arcos, permitiendo, entre otras cosas, generar una serie de tablas de dimensionado incluidas en los manuales de los ingenieros, pero para entonces los nuevos materiales empezaban a sustituir a la piedra. Así, en 1779 A. Darby construiría el primer puente de hierro en Coaldbrookdale (UK) *figura 20* y pronto le seguirían nuevos ejemplos.

## 4.5 Patologías

Una vez retirada la cimbra del arco, éste entra en carga y empieza a empujar contra los estribos. Hay veces que como consecuencia de este empuje se produce un pequeño incremento de la luz del arco, siendo necesario que las dovelas se acomoden a la nueva geometría (*figura 19*) Si los movimientos son pequeños, el arco no sufrirá más que un pequeño desplazamiento, pero si el movimiento es mayor se producen una serie de rótulas a lo largo de la directriz del arco, llegando incluso a causar el colapso del mismo.

Coulomb estudió los mecanismos de colapso de los arcos, concluyendo que para investigar la estabilidad del arco no es suficiente considerar deslizamientos relativos entre las dovelas, debiendo comprobarse también la posibilidad de rotaciones relativas.



Figura 19



## 4.6 Los materiales

En los inicios hemos visto que los arcos eran de adobe, ladrillo o piedra.

Menos frecuente era encontrar arcos de madera, como el de la *figura 20* -Tithe Barn (1334-1379) Inglaterra- con 9 m de luz.

El perfeccionamiento en las técnicas de fabricación de hierro permitió su uso como material estructural. En los inicios los elementos eran de fundición, material poco resistente a la tracción y bastante a la compresión, por lo que interesaba que todos los elementos trabajaran a compresión, tal y como ocurre en el caso de los arcos. En las *figuras 21 y 22* se muestran ejemplos de este tipo de arcos.



*Figura 20*



*Figura 21*



*Figura 22*

A pesar de que en el s. XX los nuevos materiales (hormigón y acero) sustituirán a la piedra como material estructural, el ladrillo volverá a tomar protagonismo de la mano del Modernismo. La *figura 22* recoge una imagen del arco de fachada del Mercado de Colón (1914-1916), del arquitecto Francisco de Mora y Berenguer ejecutado con ladrillo cocido.

En las puertas del s. XXI, todavía se construyen arcos. Es posible encontrar numerosos ejemplos en la obra del arquitecto Santiago Calatrava. Sirvan de ejemplo los arcos de l'Umbracle de la *figura 24*. Como ejemplo de arco de hormigón se ha elegido el edificio de la Casa de las Culturas del Mundo (Berlín 1957) reconstruida en 1989 tras el colapso de la misma.



*Figura 23*



*Figura 24*



*Figura 25*



## 5 Conclusión

El arco ha sido durante muchos siglos un elemento estructural imprescindible para abrir huecos en los muros o alcanzar la otra orilla del río. Forma parte indiscutible de todo el patrimonio eclesiástico y de numerosa obra civil, heredada de los romanos o construida en la actualidad. El ingeniero Eduardo Torroja (1899 – 1961) lo describe, en su libro “Razón y ser de los tipos estructurales” de la siguiente manera:

*El arco es el mayor invento tensional del arte clásico. Él sigue impresionando al vulgo, y la humanidad ha tardado mucho en acostumbrarse a su fenómeno resistente; prueba de ello es la frecuencia con que la leyenda achaca al diablo su construcción... Si la columna es arquitectura pura, el arco es ingeniería; o mejor dicho, el arco es técnica...*

*Las predilecciones del Arte han sido para el arco; ese arco nunca duerme, según reza el proverbio árabe... ese arco que, en su encorvamiento vuela sobre el vano y da la sensación de algo más dramáticamente tensional que la columna... va siempre unido a la idea de esfuerzo por resistir, de salto por dominar la distancia. Por eso es el elegido para proclamar los honores de la victoria.*

*Construir un arco no es tan sencillo como poner una columna. Para construir el arco hace falta sostener todas y cada una de sus dovelas hasta sostener la clave, sólo entonces entra el arco en acción y se realiza el equilibrio.*

Como actividad complementaria se propone el estudio de los arcos del entorno cercano, intentando situarlos en un determinado periodo de la historia en función del material utilizado, la luz que salvan y la forma de la directriz. Este trabajo se puede complementar intentando buscar el antifunicular que corresponde a las cargas que debe soportar el arco, comprobando cuan adecuada es forma adoptada.

## 6 Bibliografía

### 6.1 Libros:

- [1] Timoshenko, Stephen P.: “History of strength of materials”, Dover publications, INC, New York, 1983.
- [2] Heyman, Jacques.: “La ciencia de las estructuras”, Ed. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2001
- [3] Heyman, Jacques.: “Teoría historia y restauración de las estructuras de fábrica”, Ed. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 1995
- [4] Cervera Bravo, Jaime.: “Cálculo de estructuras y resistencia de materiales. Origen y desarrollo de los conceptos utilizados” Tesis doctoral defendida en Madrid,
- [5] Eduardo Torroja.: “Razón y ser de los tipos estructurales” Edit CSIC 1991



## 6.2 Fotografías y dibujos

*Figura 1.* Partes del arco y esquema de cargas. Autora de los dibujos Arianna Guardiola.

*Figura 2.* Durdle Door, Dorset (UK) Autor de la fotografía Agustín Pérez Guardiola y valle del río Mijares (Castellón). Autora de la fotografía Arianna Guardiola.

*Figura 3.* Almacenes del Ramesseum Egypt. Depositada por el autor para el uso de dominio público <http://www.shelbyroot.com>

*Figura 4.* Falso arco (Teruel) Autora de la fotografía Arianna Guardiola.

*Figura 5.* Puerta de Ishtar (Museo de Pérgamo en Berlín) © Raimond Spekking / Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0 & GFDL

*Figura 6.* El coliseo romano (Roma) Autora de la fotografía Arianna Guardiola.

*Figura 7.* Lámina de la rehabilitación del puente de Alcántara. Material expuesto en el museo de prehistoria de la ciudad de Valencia con motivo de la exposición ARTIFEX ingeniería romana en España. Autora de la fotografía Arianna Guardiola.

*Figura 8.* Maqueta de cimbra de madera Material expuesto en el museo de prehistoria de la ciudad de Valencia con motivo de la exposición ARTIFEX ingeniería romana en España. Autora de la fotografía Arianna Guardiola.

*Figura 9.* Claustro de la catedral de la Seu d'Urguell. (Autora de las fotografías Arianna Guardiola.

*Figura 10.* Santa María del Naranco en Asturias. Autora de la fotografía Luisa Basset.

*Figura 11.* Arco polilobulado de la catedral de Wells. Autora de la fotografía Luisa Basset.

*Figura 12 y 13* Arco en tijera y arcos apuntados de la catedral de Wells. Autora de las fotografías Arianna Guardiola.

*Figura 14.* Páginas del cuaderno de viajes de Villard de Honnecourt. Imágenes depositadas en Wikimedia commons para uso de dominio público. [http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Villard\\_de\\_Honnecourt?uselang=es](http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Villard_de_Honnecourt?uselang=es)

*Figura 15.* Maqueta de construcción de la catedral de Salisbury (UK) Autora de las fotografías Arianna Guardiola.

*Figura 16.* Dibujos de Leonardo da Vinci sobre arcos. Del código del *Institut de France* de París. *Esta imagen forma parte del dominio público en razón de la fecha de muerte de su autor.*

*Figura 17.* Dibujos del tratado de Rodrigo Gil de Hontañón. *Esta imagen forma parte del dominio público en razón de la fecha de muerte de su autor.*

*Figura 18.* Método de Blondel. Imagen tomada de la Tesis doctoral de Jaime Cervera Bravo.

*Figura 19.* Arcos varios ubicados en Inglaterra. Autora de las fotografías Arianna Guardiola.

*Figura 20.* Tithe Barn. En Bradford on Avon (UK) Autora de las fotografías Arianna Guardiola.

*Figura 21.* The Iron Bridge sobre el río Severn cerca de Coalbrookdale. Fotografía de un grabado perteneciente a la colección del National Waterways Museum de Gloucester (UK) Autora de la fotografía Arianna Guardiola.

*Figura 22.* Estación del Norte de Valencia. Autora de la fotografía Arianna Guardiola.

*Figura 23.* El Mercado de Colón en Valencia. Autora de la fotografía Arianna Guardiola.

*Figura 24.* L'Umbracle de Santiago Calatrava en Valencia. Autora de la fotografía Arianna Guardiola.

*Figura 25.* Haus der Kulturen der Welt (Berlín) proyecto del arquitecto americano Hugh Stubbins. Fotografías de Arianna Guardiola.