

# Evolución de las obras de fábrica incluidas en los itinerarios históricos en España y Marruecos

## *The evolution of historical masonry-made works along historic routes in Spain and Morocco*

Ismael Carpintero García<sup>1\*</sup>

### Palabras clave

puentes; fábrica;  
evolución;

### Resumen

Los puentes de fábrica han sido la solución tradicional a lo largo de muchos siglos para materializar pasos duraderos en las vías de comunicación. La tipología de estos puentes, así como sus materiales constituyentes (sobre todo los morteros de agarre), han ido cambiando a lo largo del tiempo hasta la aparición de los modernos puentes metálicos y de hormigón.

En los itinerarios de España y Marruecos las etapas históricas se pueden agrupar en el periodo prerromano, periodo romano, la Edad Media (distinguiendo entre los reinos cristianos de la Península Ibérica, y Al-Ándalus y el Magreb), y los siglos XVII, XVIII, XIX y XX, cuando esta tipología de puentes prácticamente ya desaparece.

### Keywords

bridge; masonry;  
evolution;

### Abstract

*Masonry bridges have been the traditional solution for durable passes in historic paths. The materials they have been made of -specially the mortars- and, of course, their structural typology, have changed over time until the appearance of modern metallic and concrete bridges.*

*In Spanish and Moroccan historic routes we can distinguish different periods, which are as follows: the Pre-Roman and Roman times, the Middle Ages -telling apart the Christian and the Muslim kingdoms-, and the seventeenth, eighteenth and nineteenth centuries; up to the twentieth century when this type of bridge came to an end.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de estructuras existentes es una faceta de la ingeniería civil que paulatinamente viene cobrando relevancia dado el interés por parte de los agentes que gestionan este patrimonio dentro de sus responsabilidades de su conservación, acondicionamiento, rehabilitación y reparación.

Dentro de este campo se encuentran los puentes de las distintas redes de comunicación terrestres. En particular los puentes de fábrica resultan especialmente relevantes por su antigüedad media elevada y por la gran cantidad de ellos que existen.

Este tipo de puentes han prevalecido en las redes de comunicación de todas las civilizaciones desde sus primeras realizaciones aproximadamente en el 2.000 a.C. y hasta bien entrado el s.XX en el que durante un tiempo coexistieron con los puentes metálicos y de hormigón. Si bien fue una tipología que prácticamente desaparece al llegar la tercera década del s.XX, tuvo un repunte (particularmente en España), debido a las restricciones al consumo de acero exigidas por la demanda de los países en conflicto durante la Segunda Guerra Mundial.

De este modo en las redes viarias actualmente buena parte de los puentes que prestan servicio son de fábrica. En

España se estima que sólo en la Red de Carreteras del Estado aproximadamente los puentes arco de fábrica suponen un 30% del total (unos 3.000 puentes). En la Redes Autonómicas el número de puentes de este tipo se acerca a 4.000 [1]. En la Red Ferroviaria española se estima que los puentes de fábrica suponen actualmente del orden del 40% del total (unos 3.000 puentes igualmente) [2].

Frente a la importancia señalada del parque de puentes de las distintas redes, lo cierto es que dado que se trata de una tipología prácticamente abandonada desde la primera mitad del s.XX, su estudio ha sido abandonado de las Escuelas Técnicas que forman a los ingenieros actuales.

Así pues se produce el hecho de que ante la necesidad de gestionar unos puentes de fábrica que dada su antigüedad necesitan especialmente actuaciones de conservación o rehabilitación, justamente debido a esa antigüedad los técnicos actuales carecen en general de la formación necesaria para llevar estos trabajos a cabo.

Los puentes arco de fábrica fueron construidos siguiendo reglas empíricas que en ocasiones han llegado a nuestros días gracias a distintos tratados que se han conservado en el tiempo. Sólo a partir del s.XVIII comienzan a desarrollarse estudios experimentales y posteriormente, ya en el s.XIX, teorías de cálculo estructural para estimar el comportamiento de las estructuras frente a las cargas que las solicitan y sus condiciones de seguridad. Precisamente al empezar el s.XX, cuando mayor desarrollo comenzaron a tener las teorías de cálculo estructural, fue cuando se

\* Autor de contacto: [ismael.carpintero@cedex.es](mailto:ismael.carpintero@cedex.es)

<sup>1</sup> Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, Madrid, España.



**Figura 1.** Vías romanas en la Península Ibérica.

abandonó la tipología de los puentes de fábrica, lo que dificultaba si cabe aún más su estudio ya que no se disponía de herramientas analíticas suficientemente contrastadas.

Esta circunstancia comienza a revertir a partir de finales del s.XX cuando a raíz de la necesidad de mantener estas estructuras, aparecen distintos trabajos científicos orientados a analizar su comportamiento estructural. En todo caso es cierto que aún hoy no existe una metodología suficientemente extendida para abordar este tipo de estudios.

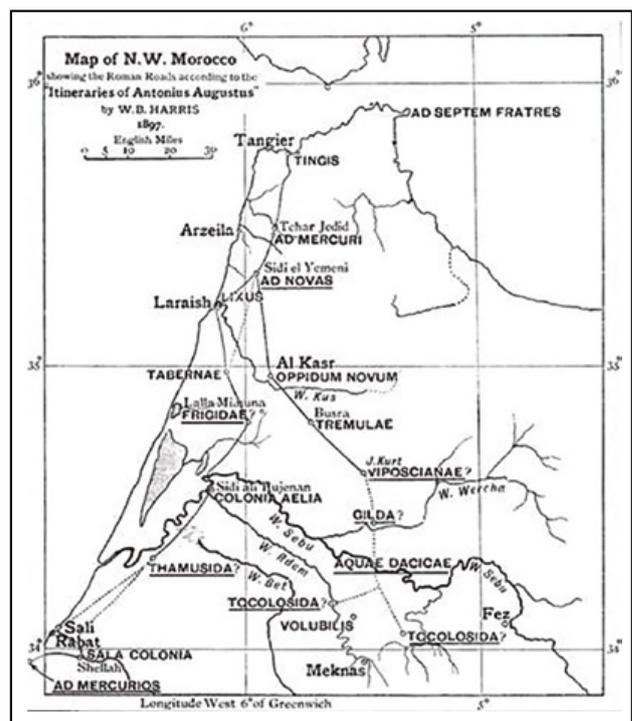
## 2. REDES BÁSICAS DE COMUNICACIÓN TERRESTRES EN ESPAÑA Y MARRUECOS A LO LARGO DE LA HISTORIA

En las redes de caminos y carreteras, los puentes de fábrica que actualmente prestan servicio se encuentran en vías de comunicación secundarias, así como en los accesos a ciudades históricas. Es decir, allí donde se mantienen las vías de comunicación más antiguas. En el caso de los ferrocarriles sin embargo aún se mantienen muchos de ellos formando parte de las vías principales convencionales.

En el caso de España y Marruecos, los itinerarios principales a lo largo de la Historia de las vías de comunicación han sido los siguientes:

### 2.1. Caminos y carreteras

Si bien existían caminos anteriores a la llegada de la civilización romana a la Península Ibérica y el norte de África, fueron éstos los que, apoyándose en las vías pre-existentes, desarrollaron una política de construcción y mantenimiento de infraestructuras viarias cuyo nivel tecnológico no volvió a alcanzarse prácticamente hasta el s.XVIII.



**Figura 2.** Vías romanas en el norte de Marruecos.

Habitualmente se reconoce que uno de los factores fundamentales de la pervivencia en el tiempo del Imperio Romano frente a otras culturas y civilizaciones anteriores fue su capacidad de vertebración de un territorio enorme a través de sus famosas vías, a pesar de no contar con medios de locomoción especialmente veloces.

Durante la Edad Media se potencia en los reinos cristianos el Camino de Santiago, verdadera autopista de comunicación cultural con el resto de Europa; y desde el s.XII las cañadas como vías pecuarias para el traslado del ganado.



dial; y la instauración de la Segunda República, que suspendió las ayudas del Estatuto de 1924.

El s.XIX en Marruecos fue, como el anterior, bastante convulso desde un punto de vista político, lo que no permitió un significativo desarrollo de su red viaria. En este siglo los monarcas alauitas se enfrentaron a diversas rebeliones interiores y a la influencia e intervenciones de las potencias europeas. Esta época culmina a principios del s.XX con el establecimiento de los Protectorados Español y Francés.

Durante estos protectorados ambas potencias buscaron desarrollar las infraestructuras del país, construyendo diversas líneas ferroviarias. Este inicio del s.XX marca el declive de los puentes bóveda de fábrica, siendo uno de sus últimos impulsores Paul Séjourné, quien realizó varios proyectos de puentes de fábrica para el ferrocarril que unía Marrakech con Rabat, Mequínz y Fez hacia Túnez, pasando por Casablanca (itinerario conocido como el Camino Imperial)[3].

Esta línea, a su paso por Sidi Kacem (llamado Petitjean en época de los protectorados) enlazaba con otra que discurría hacia el Norte por el territorio del Protectorado Español hacia Tánger, ésta construida bajo la dirección de José Eugenio Ribera. En el tramo del Protectorado Español la mayor parte de los puentes fueron de tablero de hormigón, mientras que en la zona bajo Protectorado Francés se construyeron varios puentes de fábrica aprovechando las canteras que a tal efecto había disponibles en las proximidades de Mequínz [4].

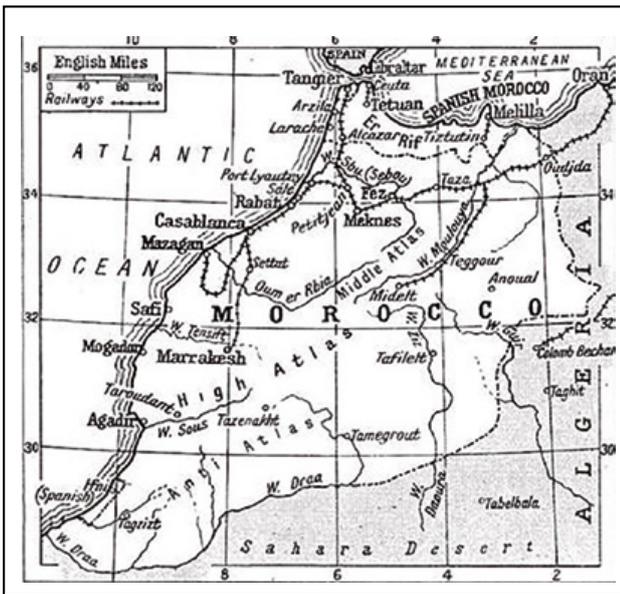


Figura 4. Red ferroviaria durante los protectorados español y francés en Marruecos.

### 3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS MATERIALES Y TIPOLOGÍAS UTILIZADAS EN LOS PUENTES DE FÁBRICA EN ESPAÑA Y MARRUECOS

#### 3.1. Periodo preromano

Desde los comienzos de la civilización, el establecimiento de vías terrestres de comunicación ha exigido la construcción de pasos con el propósito de salvar los obstáculos naturales existentes. Inicialmente los pasos artificiales se resolvían con elementos suspendidos o con elementos sometidos a esfuerzos de flexión.

Posiblemente la aparición del arco tenga que ver con la observación de arcos naturales, aunque el gran descubrimiento fue el de darse cuenta que esa disposición podía reproducirse mediante piezas pequeñas adecuadamente talladas y dispuestas de manera que estuviesen comprimidas entre sí. Este descubrimiento debió hacerse de forma progresiva acodalando piezas de cada vez menores dimensiones.

La disposición estructural de las dovelas en el arco permite aprovechar de manera óptima las características de los materiales pétreos, que son muy resistentes a compresión y muy poco a tracción, facilitando la consecución de luces notables. Como reza un antiguo proverbio árabe, “el arco nunca duerme”, haciendo referencia a que permanentemente se encuentra comprimido y equilibrado [5].

#### 3.1.1. Materiales

Las fábricas comenzaron a construirse “a hueso”, apoyando unos materiales pétreos sobre otros. Con el paso del tiempo las distintas civilizaciones se dieron cuenta que la interposición de una capa de aglomerante mejoraba la resistencia de la fábrica al mejorar la transferencia de tensiones entre piezas, además de facilitar en gran medida la propia ejecución de la fábrica.

A tal fin desde muy antiguo se han utilizado distintos tipos de morteros fabricados a partir de un conglomerante que, mezclado con agua y áridos, tenían capacidad formácea en estado fresco y endurecían con el tiempo. Como conglomerante inicialmente se utilizó arcilla, posteriormente sustituida por otros materiales, en general obtenidos del molido de materiales pétreos (cementos naturales). Los más habituales eran el betún (utilizado en la civilización

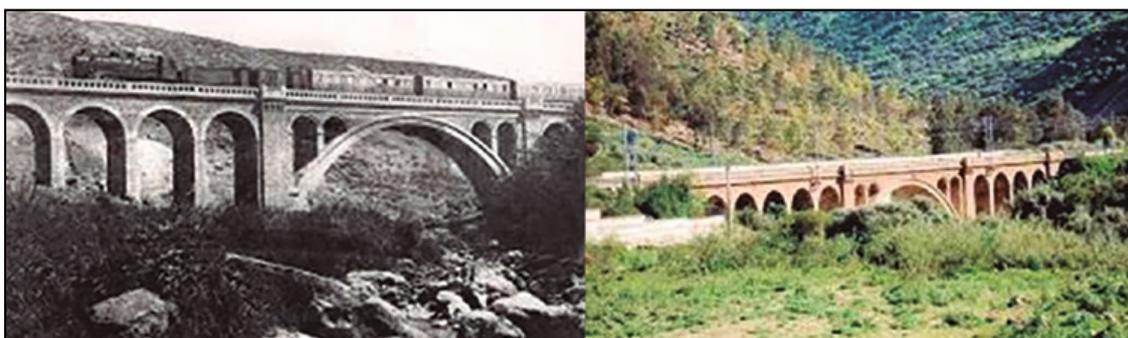


Figura 5. Puente de ferrocarril construido durante el Protectorado Francés en Sidi Kacem.

Mesopotámica<sup>1</sup>), el yeso (usado en la civilización egipcia y posteriormente por la cultura árabe [6], y sobre todo, la cal. Éste último aglomerante fue profusamente utilizado en las antiguas civilizaciones de Egipto, Grecia, Roma, China, e incluso en las culturas americanas.

Algunas de estas cales eran hidráulicas, es decir, tenían la capacidad de endurecer bajo el agua. Esta hidraulicidad se producía por la presencia natural o como adiciones de materiales arcillosos (silicatos, puzolanas, etc.), ya que la cal pura de por sí no es hidráulica<sup>2</sup>.

Estas impurezas inicialmente se encontraban junto con la piedra caliza de origen, si bien según fueron descubriéndose sus propiedades se empezaron a añadir distintos materiales arcillosos a las cales aéreas. Otros aditivos que se utilizaban con las cales fueron la sangre de bovino como impermeabilizante, fibras naturales (pelo de animal, fibras vegetales, etc.), urea, clara de huevo, etc.

En cuanto a las piezas que conforman la fábrica, además de fragmentos de materiales pétreos más o menos tallados, colocados "a hueso" o con mortero de asiento, se utilizó el tapial (muros de barro, en ocasiones con fibras vegetales), el adobe (piezas de pequeño formato de barro con fibras secadas al Sol) para posteriormente, a través de un proceso de cocción de piezas hechas con ese barro, llegar al ladrillo cerámico

### 3.1.2. Tipología de las estructuras

Los ejemplos más primitivos de obras de paso son las pasarelas colgantes, soportadas por cables elaborados con lianas trenzadas, que se tendían entre árboles o rocas. Sin embargo, la necesidad de transportar vehículos con funcionalidad y seguridad impuso la necesidad de utilizar elementos más resistentes y rígidos, recurriéndose al empleo de la madera y la piedra.

La piedra comenzó a usarse en la construcción de los tableros de puentes más simples mediante la utilización de grandes losas naturales. Esta disposición limitaba poderosamente la luz libre salvable debido a la escasa resistencia a flexión de este material. Por ello, cuando las corrientes y las profundidades de los ríos lo permitían, se recurría a disponer apoyos apilastrados intermedios, posibilitando la ejecución de pasos de mayor longitud.

Debido a su buen comportamiento a flexión, el empleo de elementos de madera dispuestos horizontalmente con sus extremos apoyados sobre pilastras de piedra o pilotes de madera, permitía construir tableros más funcionales y de mayores luces que los de piedra, aunque con el notable inconveniente de su escasa durabilidad.

Otra disposición estructural ensayada en los primeros puentes para salvar o disminuir la luz de los tramos es la de construcción en voladizo, ya fuera utilizando la madera o la piedra. La ejecución de apoyos con forma de tronco de

pirámide invertido reducía la luz en la coronación, con lo que se facilitaba la construcción del tablero.

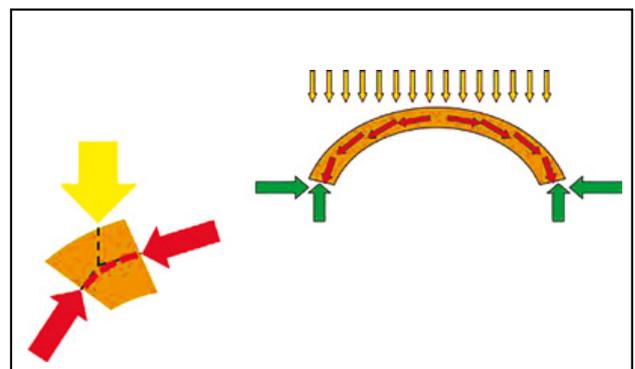
Una evolución en este sentido fue la utilización de piezas más pequeñas construidas en voladizo trabándolas entre sí para formar falsas bóvedas y falsas cúpulas. La técnica consistía en disponer hiladas sucesivas de piedra que vuelan ligeramente sobre la inferior y que arrancando desde ambos apoyos se encuentran en el punto superior central del vano.

La construcción de una falsa bóveda no precisa de cimbra, pero su capacidad portante está muy limitada al verse sometida la fábrica a esfuerzos de flexión (tipo de sollicitación a los que es muy poco resistente), al contrario que en las bóvedas verdaderas, en las que como se verá, las dovelas están sometidas esencialmente a tensiones de compresión (tipo de esfuerzo al que resulta muy resistente).

El gran paso adelante en la construcción de puentes lo constituye, sin duda alguna, el descubrimiento del arco. De origen incierto, aunque existen vestigios en la civilización Etrusca en el 800 a.C. y en la antigua China, si bien hay autores que sostienen que ya eran conocidos desde el 2.000 a.C por los Sumerios en Mesopotamia.

Posiblemente de nuevo la aparición del arco tenga que ver con la observación de arcos naturales, aunque el gran descubrimiento fue el de darse cuenta que esa disposición podía reproducirse mediante piezas pequeñas adecuadamente talladas y dispuestas de manera que estuviesen comprimidas entre sí. Este descubrimiento debió hacerse de forma progresiva acodalando piezas de cada vez menores dimensiones.

En el arco, la acción del peso propio de las dovelas así como la capacidad de reparto y resistencia pasiva del relleno dispuesto sobre la bóveda, contribuyen a dar estabilidad y rigidez a la estructura, configurando un estado tensional previo que se ve generalmente escasamente perturbado por la aplicación de las sobrecargas frecuentes. En consecuencia, las estructuras de arcos de piedra resultan especialmente aptas por razones de seguridad, funcionalidad y durabilidad para la construcción de puentes, por lo que han sido erigidas durante milenios y muchas de ellas continúan siendo utilizadas en la actualidad con excelente comportamiento.



**Figura 6.** Esquema básico de funcionamiento estructural de un arco exento.

### 3.1.3. Tipología de las cimentaciones

Una parte especialmente delicada de estas obras son las cimentaciones. Los puentes de piedra transmiten al terreno cargas notables a través de las pilas, aplicándolas, en

<sup>1</sup> Cabe mencionar la cita del libro del Génesis en el Antiguo Testamento, Génesis 11:30 Y se dijeron unos a otros: "Vamos, fabriquemos ladrillos y cozámoslos bien." Y usaron ladrillo en lugar de piedra y asfalto en lugar de mortero.

<sup>2</sup> Son las impurezas de naturaleza silícea y/o aluminosa, presentes en materiales arcillosos, la que le confieren esa hidraulicidad (al formarse silicatos y aluminatos cálcicos).

general, sobre áreas bastante reducidas. Por tanto, han de buscarse para estas estructuras, ubicaciones en las que la existencia de un estrato superficial duro, preferiblemente un afloramiento rocoso, permita cimentar de forma cómoda y segura sus apoyos. Es el principio vitrubiano de la apropiada elección del emplazamiento de la obra, no siempre fácil de satisfacer.

En la Antigüedad, cuando no era posible encontrar un emplazamiento que permitiera la ejecución de la cimentación por procedimientos sencillos, había de recurrirse al ensanche de la base mediante zapatas amplias o emparrillados que repartieran las cargas superficialmente o a la ejecución de pilotes que las transmitieran en profundidad.

Cuando los terrenos destinados a servir de soporte a la cimentación estaban cubiertos por las aguas, se disponían inicialmente piedras gruesas vertidas a granel en las zonas donde se pensaba cimentar, que quedaban con su talud natural, hasta constituir un montículo que sobresalía por encima del nivel del agua sobre el cual era fácil comenzar a disponer los sillares de los apoyos. De este modo surgieron las cimentaciones sobre escollera. Sin embargo, este tipo de cimentaciones cayó posteriormente en desuso al causar la ruina de muchos puentes. Efectivamente, las escolleras así dispuestas reducían sensiblemente la sección de desagüe bajo el puente, provocando aumentos notables de la velocidad de la corriente, lo que originaba socavaciones locales y generales bajo el puente.

En terrenos muy blandos o socavables o donde además la piedra escaseaba, se recurría al empleo de pilotes como cimienta de puentes, combinándolos en la mayoría de los casos con escollera. Se tiene constancia, desde tiempos muy remotos, del empleo de cimentaciones sobre pilotes de madera hincados. La hinca de pilotes de madera trata de aprovechar dos ventajas esenciales de las cimentaciones profundas:

- La traslación de las cargas de la estructura a cotas situadas por debajo de la superficie es un efecto positivo si se constata que el suelo mejora su capacidad resistente con la profundidad.
- El terreno ejerce contra el pilote una resistencia tanto en la punta como a lo largo de toda su longitud, lo que puede llegar a proporcionar una considerable capacidad portante.

### 3.2. Periodo romano

La política expansionista de Roma precisaba de vías de comunicación duraderas y resistentes para dar cumplida satisfacción a las exigencias militares y comerciales de desplazar rápidamente tropas y posibilitar el paso de vehículos. Ello se tradujo en la necesidad de construir muchas obras de paso, lo que explica la búsqueda tanto de la tipología más adecuada como de los materiales más resistentes y duraderos.

El constructor romano también empleó en sus comienzos la madera, especialmente en la construcción de pasos provisionales por motivos bélicos. Para dotarla de mayor durabilidad, aprendió a saturarla con productos que la hacían más incombustible y a impregnarla de aceites y resinas para protegerla contra la pudrición.

Pero el periodo romano se caracterizó, fundamentalmente, por un gran desarrollo de la ingeniería de puentes y la construcción de obras de paso sólidas, permanentes y durables, tal y como exigía el mantenimiento de las comunicaciones entre la metrópoli y las colonias. Se generalizó y perfeccionó el uso del arco como tipología resistente y se desarrolló, con gran maestría, el empleo de la piedra, el ladrillo y el hormigón como materiales de construcción.

#### 3.2.1. Materiales

En la construcción de puentes se empleaban las piedras más próximas al lugar de la obra, aunque en algunas regiones, como la Bética, era muy común el empleo de ladrillos, sobre todo en las bóvedas. Los ladrillos eran elaborados con una mezcla de tierra roja, arcilla blanca y arena.

Uno de los mayores logros de los romanos fue el descubrimiento del hormigón. Observaron que mezclando puzolanas, (rocas volcánicas muy fragmentadas abundantes en las regiones de los volcanes Vesubio y Etna), con cal ordinaria, arena y grava se lograba una mezcla que endurecía con agua y adquiría en poco tiempo una consistencia pétre, incluso en ambientes sumergidos. Este descubrimiento habría tenido una utilidad muy limitada de no haberse podido fabricar un producto parecido que no necesitara de las cenizas mencionadas. El gran hallazgo consistió en descubrir que algunas piedras machacadas tenían las mismas propiedades aglomerantes que las puzolanas. La elaboración de los hormigones, alcanzó gran perfección y gracias a ello consiguieron excelentes compacidades y monolitismo en sus fábricas, que han perdurado a través de los tiempos hasta nuestros días.

Los romanos utilizaron diversos tipos de fábricas, sin embargo, las más frecuentes eran: el opus incertum, que era una fábrica compuesta por paramentos de mampostería ordinaria en seco, entre los que se disponían capas de hormigón que los consolidaban, y el opus quadratum, donde los paramentos, en cuyo interior se alojaba el hormigón, se ejecutaban con sillares regulares en seco.

No obstante, hay que apuntar que, a pesar de haber descubierto un conglomerante hidráulico perfecto, el constructor romano no lo empleaba con frecuencia. Prefería utilizar la sillería, tallando y colocando los bloques de piedra con mucha precisión, “a hueso” sin mortero.

#### 3.2.2. Tipología de las Estructuras

Si bien los romanos no fueron los inventores del arco, sí que lo emplearon profusamente, perfeccionando su construcción en gran medida y extendiendo su empleo en todo su vasto Imperio.

Los romanos utilizaron habitualmente la bóveda de medio punto, cuya directriz si bien no es óptima desde el punto de vista del aprovechamiento del trabajo estructural del arco, presenta sin embargo una gran facilidad constructiva. Al ser de radio constante, estos arcos permitían un fácil replanteo y una construcción sencilla con dovelas radiales totalmente idénticas entre sí. Además, la utilización de pilas robustas les permitía utilizar el procedimiento de construcción de puentes por arcos sucesivos, lo cual posibilitaba la reutilización de cimbras en cada vano.

Según Fernández Casado [7], estos puentes pueden ser, en esencia, clasificados cronológicamente en dos grandes grupos: los puentes de la República y los del Imperio.

Se pueden encontrar algunas características comunes en los puentes de la República, en los que se aprecia menor dominio de la técnica de construcción. Suelen ser de alzado robusto y opaco, dotados generalmente de calzadas amplias y pilas muy gruesas y cortas. Presentan arquillos de aligeramiento y se caracterizan porque la rasante, que puede ser horizontal o también en doble vertiente, (lomo de asno), suele estar muy baja, hasta tal punto que en muchos casos, como en el puente de Luco en Teruel, los arranques de los arcos quedan cubiertos por las aguas.

En los puentes de la República, la relación entre el ancho de las pilas y la luz del vano correspondiente es del orden de  $\frac{1}{2}$ , lo que contribuye a aumentar la pesadez del puente. Como ejemplo más significativo de los puentes de esta época, cabe destacar el puente de Mérida, en Badajoz, con 783 m de longitud y 60 bóvedas semicirculares sobre pilas-estribo aligeradas con arquillos de desagüe, considerado el mayor puente de la Edad Antigua.



Figura 7. Puentes de Mérida (Badajoz).

Esta relación de anchuras, además de las bajas rasantes, hacía que la sección de desagüe de estos puentes fuera muy pequeña. Esto daba lugar a graves problemas cuando crecían las aguas, puesto que el puente ejercía un efecto presa y los empujes originados por el agua amenazaban la estabilidad transversal del puente; y además el incremento de la velocidad de las aguas favorecía el desarrollo de los fenómenos de socavación. La situación se aliviaba, en parte, con la ayuda de los arquillos de aligeramiento, que desaguaban parte de las aguas en las crecidas, aunque su presencia no era suficiente en muchos de los casos.

En éste período, las pilas disponían frecuentemente de tajamares de planta semicircular en el borde de aguas arriba y, en ocasiones, de contrafuertes aguas abajo.

En cuanto a los puentes construidos en la época del Imperio, se caracterizan por ser apreciablemente más esbeltos. Disminuye el número de vanos, se incrementa su luz y las pilas se vuelven proporcionalmente mucho más delgadas. Ejemplos de puentes del Imperio pueden ser el famoso Puente de Alcántara, y el de Salamanca. En el Puente de Alcántara, sobre el río Tajo en Cáceres, se alcanza una relación pila/vano que no llega al tercio del diámetro central. Este puente paradigmático de gran belleza tiene una longitud de 194 m y consta de 6 arcos, la luz máxima es de 30 m y la mínima de 18 m, lo que pone de manifiesto la perfección técnica lograda por los ingenieros romanos.

Según se va disminuyendo la relación entre la anchura de pila y la de vano, el puente se hace menos opaco y se reduce el efecto presa del puente, al permitir una mayor sección de desagüe. Por este motivo dejan de ser necesarios y desaparecen los arquillos de aligeramiento hasta ser recuperados de nuevo en la Edad Media.

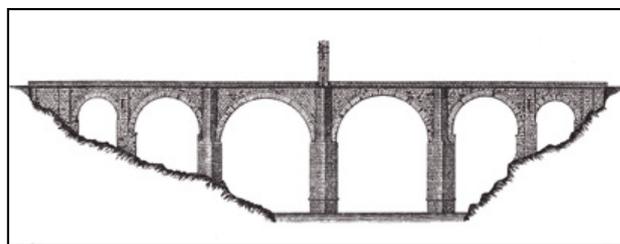


Figura 8. Puente de Alcántara.

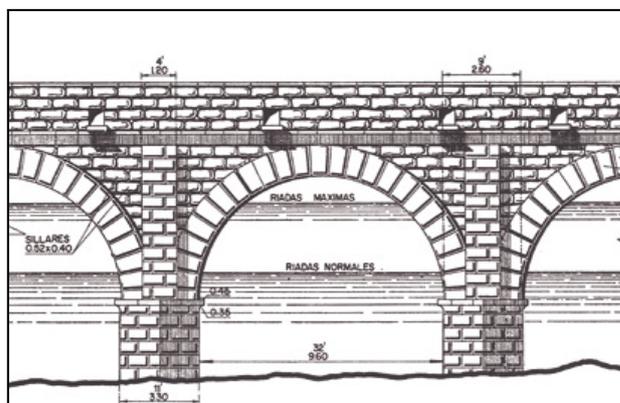


Figura 9. Puente de Salamanca.

Durante el Imperio hay dos cambios significativos en la tipología de los puentes: por un lado, se adopta definitivamente la rasante horizontal y se abandona la rasante en lomo de asno empleada en la República, y por otra parte, en muchos puentes se rebajan las bóvedas, en lugar de ser arcos de medio punto ahora son rebajados de tipo escarzano.

Los tajamares pasan a tener una forma triangular, en algunos casos van rematados por un sombrero y son más altos, llegando hasta arriba en algunos ejemplos, como en los puentes de Alcántara y Alconetar, ambos en Cáceres; y el puente sobre el río Medjerda (antiguamente llamado río Bragadas), cerca de la antigua cantera de mármol de Chemtou (Túnez). Éste fue el puente romano más grande del norte de África.

Como elementos propios de los puentes romanos se pueden destacar los Arcos de Triunfo u Honoríficos, presentes en muchos de los puentes de la península ibérica (véase la figura 14).

Los romanos levantaron numerosos puentes en España, de los cuales, la mayoría aún permanece en pie y algunos prestan servicio todavía desde hace más de veinte siglos sin más interrupciones que las producidas por las invasiones y guerras que motivaron su destrucción parcial y exigieron después su reparación. En Marruecos el Imperio tuvo menos presencia, aunque también fue importante. Este hecho, junto con el régimen torrencial de sus cursos de agua, como se explica a continuación, justifican el menor número de puentes romanos en el Norte de África que han llegado prestando servicio hasta nuestros días.



**Figura 10.** Puente romano sobre el río Medjerda (Túnez).

### 3.2.3. Tipología de las Cimentaciones

La superestructura de los puentes romanos era por regla general bastante estable, sin embargo, no se puede decir lo mismo de las cimentaciones que, debido a la insuficiencia de los medios tecnológicos existentes para dimensionarlas y ejecutarlas adecuadamente en suelos difíciles, sufrieron con frecuencia los devastadores efectos de las avenidas.

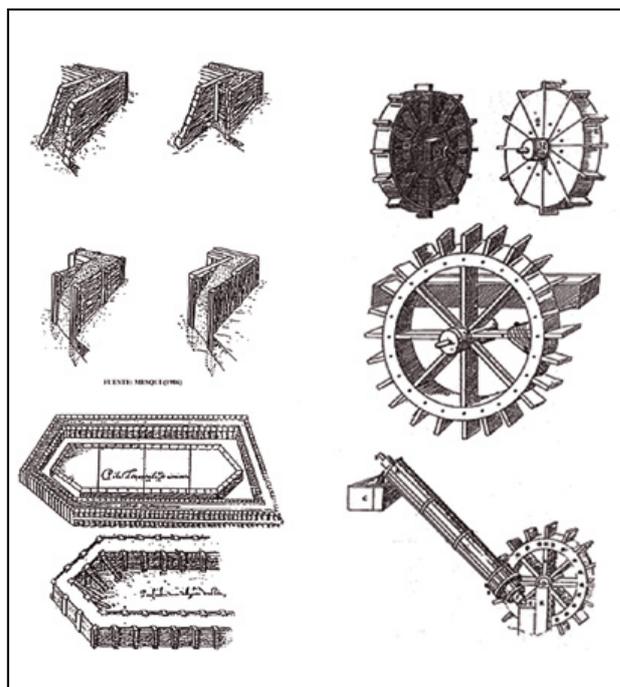
El fenómeno de la socavación produjo el hundimiento de numerosos puentes. Su origen directo estaba en la inadecuación de su cimentación y en la escasa sección de desagüe libre bajo el puente, como consecuencia del grueso espesor de las pilas y los depósitos de sedimentos y ramajes en periodos de crecidas. Un ejemplo es el del mencionado puente sobre el río Medjerda. Cimentado mediante losas de mortero de cal y piedra, con una protección de escolera, colapsó en el s.IV debido a la afección a su cimentación por la fuerte corriente fluvial [10].

Los romanos conocían este fenómeno y luchaban contra él disponiendo tajamares de formas hidrodinámicas, pero sobre todo buscando cimentaciones sobre roca viva, no socavable, aún a costa de tener que ir a luces variables.

Lo normal, sin embargo, era no encontrar tales puntos de apoyo superficial sobre terreno duro. Entonces, se recurría a construir las cimentaciones en épocas de estiaje, con la ayuda de ataguías o pequeñas presas, intentando dejar en seco la zona de obra. En otras ocasiones conseguían, con grandes dificultades, desviar el curso del río. Sin embargo, cuando esto no era posible, se recurría al empleo de pilotes de madera, hincados en el terreno con mazas, con encepados de madera rellenos de hormigón de cal hidráulica.

La ejecución de la cimentación en seco se resolvía habitualmente mediante la construcción previa de un recinto estanco o ataguía. La ataguía estaba constituida esencialmente por un doble recinto de tablestacas reforzadas con pilotes, que aseguraban la rigidez del conjunto. El espacio situado entre los dos recintos se llenaba con tierra gredosa o arcilla, a veces mezclada con estopa o estiércol. Posteriormente había que proceder a achicar el agua del interior, labor nada fácil de realizar.

Los pilotes encontrados tenían azuches metálicos que les protegían durante la hinca. Estos conjuntos de pilotes soportaban una plataforma de madera que formaba un encepado sobre el que se colocaba la mampostería. Las excavaciones han permitido descubrir que, generalmente, la longitud de los pilotes no sobrepasaba los 10 m.



**Figura 11.** Ataguías o pequeñas presas y bombas de achique.

### 3.3. Edad Media en los reinos cristianos de la península

La caída del Imperio Romano supuso un cambio en el sistema político, volviéndose a una estructura territorial que imponía grandes medidas de protección, dentro de las cuales los puentes podían ser peligrosos, al facilitar los desplazamientos de las tropas. Por este motivo se produjo una paralización de las obras públicas, abandonándose las ya existentes, que progresivamente se iban deteriorando, perdiéndose la técnica de los ingenieros romanos.

La Edad Media, por tanto, supuso un retroceso tecnológico. La construcción de puentes se complicó, al convertirse éstos en bienes particulares. El dinero necesario para su construcción se obtenía bien por parte de alguna institución que sufragaba las obras, o bien, de forma más común, por la donación voluntaria o forzosa. Las aportaciones forzosas, conocidas como "pontazgos" (una especie de impuesto de circulación o peaje a toda persona que intentaba cruzar el puente).

La construcción de puentes en España, tras un gran paréntesis, reaparece en el siglo IX, gracias a la Iglesia, la cual sufragaba la construcción de puentes en los caminos de peregrinación, (como por ejemplo, a lo largo del Camino de Santiago). Los grandes señores feudales no solían favorecer estas empresas, e incluso llegaron a fortificar obras ya existentes.

### 3.3.1. Materiales

La piedra siguió siendo, lógicamente, el material básico de las obras. Sin embargo, por razones sociales, económicas y técnicas, su utilización se ve sometida a cambios y restricciones apreciables respecto a la época romana.

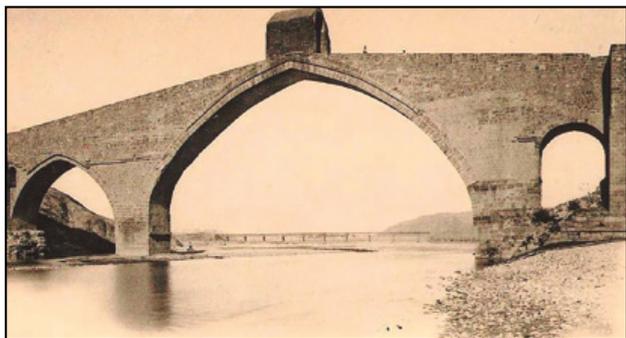
Las tradiciones de los constructores romanos se perdieron en gran medida. El hormigón dejó de ser utilizado, para dar paso en la ejecución de rellenos a pobres e irregulares mezclas de cascote y mortero. Los morteros eran mediocres, de cal mal cocida o apagada y arena arcillosa.

Trataron también de levantar construcciones sólidas y duraderas, pero emplear el procedimiento romano habitual de componer obras con enormes sillares, cuidadosamente labrados y asentados con rellenos de hormigón exigía medios materiales, humanos y técnicos de los que no se podían disponer en esta época. Así pues, se rebajaron las exigencias de calidad en la construcción de las fábricas, empleando preferentemente sillarejos con gruesos lechos en los paramentos y compactando con cascote y mortero pobre el interior.

No pudiendo disponer de recursos tan poderosos, los constructores medievales realizaron, en general, fábricas menos coherentes con falta de ligazón entre las distintas partes, lo que restaba monolitismo y perfección al conjunto.

### 3.3.2. Tipología de las Estructuras

Los puentes de la Edad Media siguieron las enseñanzas romanas, utilizando las bóvedas de medio punto. También se usan las bóvedas escarzanadas o rebajadas, muy parecidas a las anteriores, aunque de forma arbitraria y sin buscar un mejor encaje de la línea de empujes en la bóveda. Sin embargo, lo más característico de la Edad Media es el empleo del arco apuntado, ojival o gótico, (que las cruzadas habían traído de Oriente). Su empleo no aporta mejoras estructurales, dado que el vértice de la ojiva pide la presencia de una carga concentrada para completar la configuración anti-funicular de las cargas, ni de uso, porque aunque permite cubrir grandes luces, incrementa las pendientes de los accesos al volver al puente en lomo de asno, con la consiguiente incomodidad para los usuarios. Como ejemplo más representativo de puente medieval cabe citar el Puente del Diablo sobre el río Llobregat, en Martorell.



**Figura 12.** Puente del Diablo en Martorell.

Las pilas vuelven a ensancharse como consecuencia del retroceso técnico. Además, junto al mal aprovechamiento de los materiales desde el punto de vista resistente, hay que

destacar que en este periodo la mano de obra ya no es gratuita.

En los primeros siglos de la Edad Media, la herencia romana se manifestaba claramente en la utilización de los arquillos de aligeramiento en los puentes. Además de dotar al puente de mayor ligereza física y estética, como ya se ha indicado, los arquillos contribuían a incrementar la capacidad de desagüe bajo el puente, reduciendo el efecto “presa” que amenazaba la estabilidad de la obra en épocas de grandes crecidas.

En esta época el puente es un elemento fundamental desde el punto de vista defensivo, ya que se concebía prácticamente como una fortaleza. Esto se manifestaba en la tipología de los puentes, particularmente en la calzada. Para dificultar el avance de las tropas enemigas y controlar el paso de todo visitante, las calzadas eran muy estrechas, en oposición a la gran amplitud de las calzadas romanas. En algunos casos presentaban una planta quebrada, (probablemente buscando los puntos del cauce más adecuados para cimentar las pilas), que reforzaba este carácter defensivo del puente.

Dicho carácter también se manifestaba en la construcción de torres de defensa en muchos de ellos. Desgraciadamente, en la actualidad pocos son los puentes que la conservan. En algunos casos se disponía una torre en el centro, como en el Puente de Frías en Burgos, pero en otras ocasiones se levantaban dos, como en el de San Martín en Toledo, que tiene una torre en cada extremo.

Los tajamares se elevaban hasta el nivel de la coronación del puente, lo que permitía que pudieran ser usados como “apartaderos”, aliviando la extrema estrechez de la calzada y permitiendo el cruce de los carros. Normalmente, eran de sección triangular aguas arriba y rectangular aguas abajo.

### 3.3.3. Tipología de las Cimentaciones

Obviamente, la ejecución de cimentaciones superficiales siempre fue la solución técnica buscada dado que eran muy sencillas y baratas de construir.

Sin embargo, este tipo de cimentación no siempre era conveniente, dado que, con frecuencia, no se podía confiar en la calidad del suelo directamente accesible. Por este motivo, se hacían necesarias también las cimentaciones sobre pilotes. No resulta fácil tipificar estas cimentaciones, ya que los pocos documentos de que se dispone muestran que eran de características muy diversas, hasta tal punto que para ciertos puentes, cada pila tiene una cimentación diferente. Esta gran variedad, unida a la poca información disponible, hace que sea muy difícil extraer conclusiones.

Puede afirmarse que en la época medieval hay una preponderancia de las cimentaciones superficiales, con algunos ejemplos de cimentaciones sobre pilotes que resultan raros y heterogéneos.

Generalmente, la protección contra las socavaciones forma parte, más que de la construcción de la obra, de su mantenimiento posterior. Por tanto, resulta bastante raro encontrar antes del siglo XV, protecciones en la base de las pilas que fueran ejecutadas al mismo tiempo que la propia obra.

En casos poco frecuentes, se han encontrado recintos constituidos por pequeños pilotes, (de longitud inferior a

2 m), dispuestos de forma regular cada 30 cm. Los textos del siglo XIV indican que estos recintos servían para contener escolleras, destinadas a rellenar los huecos producidos por las socavaciones e ir manteniendo protegida la base de la pila

### 3.4. Edad Media en Al-Andalus y el Magreb

Al igual que en la Hispania Visigoda, tanto en el Norte de África, como en Al-Andalus, los constructores musulmanes mantuvieron las grandes infraestructuras heredadas de los romanos; y cuando rehabilitaron o construyeron obras nuevas lo hicieron en base a los modelos y técnicas de construcción de puentes de los romanos, cuya cultura expresamente admiraban [7]. De este modo no llegaron nunca al grado de desarrollo de infraestructuras de la cultura romana. Incluso en grandes ciudades como Sevilla, Murcia u Orihuela mantuvieron durante mucho tiempo puentes provisionales de barcas.



**Figura 13.** Puente del valle (oued) Tensif, en Marrakech.

Cabe destacar entre otros los puentes de El Cadí sobre el Genil en Granada (s.XI-XII), el puente sobre el río Henares en Guadalajara (s.X-XI), el de Alcántara de Toledo (del s.X en origen aunque muy reconstruido posteriormente), el puente de Córdoba (de origen romano y reconstruido por los musulmanes en el s.VIII), y otros puentes menores.

Por otro lado, al igual que ocurría en otras ciencias, de Al-Andalus partieron artesanos al Norte de África a construir puentes, por ejemplo en puente sobre el Tensif (1170), junto a Marrakech.

#### 3.4.1. Materiales

Los constructores musulmanes mantuvieron la tradición de construir con piedras y morteros de cal sus puentes, si bien los mudéjares (musulmanes de Al-Andalus) también construyeron puntualmente con lajas de pizarra o piezas de ladrillo, como parece ser el puente de Medina en Arévalo.

Al igual que en la España feudal, se pierde el conocimiento romano de la fabricación los morteros hidráulicos, de manera que se usan morteros de cal y en ocasiones cementos naturales (mezclas de cal y arcillas que se presentan de forma natural en canteras).

#### 3.4.2. Tipología de las Estructuras

En cuanto a la tipología estructural de los puentes se mantiene básicamente la heredada de los romanos (arcos de medio punto con gruesas pilas), incluso de manera más ortodoxa que el caso señalado en el apartado anterior para la cultura cristiana en cuanto al ancho de las calzadas y la presencia de apartaderos sobre los tajamares.

Sobre la base general de arcos de medio punto se incorporan otras dos tipologías que fueron mucho más utilizadas en el ámbito de la arquitectura de edificios y fortalezas: el arco ojival de origen oriental (muy empleado por el Imperio Otomano); y el arco de herradura. Como ejemplo puede mencionarse el Puente del Arzobispo (Toledo), aunque situado en el Reino de Castilla, está basado en la tradición romana y árabe.

Dentro de los arcos ojivales aparece el específicamente arco ojival árabe cuya directriz se define a partir de la posición de los centro de las dos circunferencias que forman el arco, situándolos a  $1/6$  y  $5/6$  de la luz del vano entre arranques del arco. Esta tipología sólo aparece en contadas ocasiones y en general salvando los vanos principales del puente.

Por otro lado también aparece el arco de herradura (o ultracircular), de origen visigodo aunque fue evolucionado en su forma de acuerdo a influencias orientales de Siria y Anatolia[8] (arco califal). Este tipo de arco en el ámbito de los puentes se utilizaba puntualmente en vanos menores de desagüe frente a avenidas y en los ojillos o arquillos de aligeramiento. Estos elementos, si bien eran de origen romano, también fueron utilizados por la cultura musulmana para aligerar el empuje de las avenidas sobre puentes cuyas pilas de grandes dimensiones ocupaban buena parte del cauce.



**Figura 14.** Puente califal de Guadalajara sobre el río Henares.

En cuanto al aparejo y los encuentros entre elementos estructurales, la cultura musulmana mantuvo y desarrolló las técnicas aprendidas de los romanos. En ocasiones utilizaron arquivoltas muy sobresalientes para resaltar la forma del arco. Era típico también de las construcciones árabes que el arco arrancara sobre la pilastra de forma brusca, formando un escalón muy marcado.

Para la disposición de las dovelas, los musulmanes utilizaron en ocasiones dovelas de clave de piedra más alargadas que las restantes, incluso en arcos de lajas de pizarra o ladrillo. Este uso era más propio de la construcción de puertas, de donde se trasladó puntualmente a los puentes (por ejemplo el mencionado puente de Guadalajara).

Se mantuvieron igualmente las técnicas de aparejo de las dovelas de los romanos a soga y tizón, siendo características de la época el uso de dovelas engatilladas y el empleo de dovelas partidas alternativamente con dovelas enteras.

Los tajamares, de forma similar a los reinos cristianos, mantuvieron en general la tipología heredada de la época imperial romana: triangulares apuntados hacia aguas arriba, y cuadrados o semicirculares aguas abajo.

### 3.4.3. Tipología de las Cimentaciones

Sobre este aspecto no se produjeron innovaciones significativas respecto a las construcciones romanas. Sólo cabe mencionar que en ocasiones (como por ejemplo en el puente de Córdoba o en el de Guadalajara) se ejecutaron zampeados en el cauce bajo el puente para contener la erosión del terreno en las cimentaciones de las pilas. Esta técnica ya había sido realizada en ocasiones por los romanos e incluso en el puente medieval cristiano de Alcalá de Henares [9].

## 3.5. Siglo XVII

En este periodo histórico no se produjeron de modo directo importantes progresos en la construcción de puentes, aunque sí surgieron algunas innovaciones técnicas, funcionales y estéticas.

Desde los tiempos de Roma se habían realizado muy pocas mejoras en instrumentos y máquinas, pero con la llegada del nuevo espíritu del Renacimiento y con el objeto de reducir la mano de obra, se desarrollaron las primeras máquinas para la construcción.

Por otro lado, a finales del siglo XV surge en Italia, foco del **Renacimiento**, un movimiento de estudio que supone un retorno a las formas regulares y a los procedimientos de ejecución racionalizados de los romanos y que, sobre todo, crea una nueva concepción del puente como obra de arte. Los puentes habían de ser, según Palladio, bellos, suficientes para las necesidades, y permanentes. Esto motivó la construcción de itinerarios practicables y cómodos, y condenó las incómodas bóvedas apuntadas.

Por otra parte, en esta época comienzan a realizarse labores de reparación y reconstrucción de caminos, a cargo de concejos o de señores locales, lo que proporciona una cierta revitalización a la construcción de puentes.

Por su parte en el actual Marruecos cabe destacar el desarrollo de infraestructuras que se produjo durante el reinado de Mulay Ismail, el segundo monarca alauita. Aliado de Luis XV de Francia recibió de éste asesoramiento militar e ingenieril

para el desarrollo de su nueva capital Fez, y de los caminos que vertebraban el reino. Las tipologías de los puentes de esta época no varían sustancialmente de la época anterior. Cabe mencionar por ejemplo los puentes sobre el valle (oued) Ouem er Rabia en el camino de Fez a Marrakech, construidos para facilitar los movimientos de tropas, con arco ojival central y tajamares triangulados apuntados con sombrero. En el caso del puente de Khénifra incluso se mantiene el perfil en lomo de asno, posteriormente rectificado.

### 3.5.1. Tipología de las Estructuras en el Renacimiento

En el Renacimiento se continúa empleando el arco de medio punto, y constatada la incomodidad y los problemas prácticos que provocan los pasos alomados de la Edad Media, se utilizan más las rasantes horizontales.

Los puentes se construyen cuidando mucho las proporciones y la geometría. Se introducen las curvaturas variables pero cuidando respetar la simetría de las bóvedas. Los tajamares se afilan y se conserva la tradición medieval de los apartaderos.

Las disposiciones estructurales más frecuentemente adoptadas, junto con el arco de medio punto, eran los arcos segmentales de círculo ( $2\alpha = 90$ ) y los arcos en asa de cesta, de varios radios. En ambos casos los rebajamientos, (relaciones flecha/luz), eran superiores al medio punto; 1/3 a 1/4, aunque en algunos casos se llegaron a alcanzar 1/5 y hasta 1/7.

Los puentes más vanguardistas e innovadores en esta época fueron los italianos. Sin embargo, los puentes españoles se caracterizan por su armonía y elegancia de líneas y, sobre todo, por su sobriedad a lo largo del siglo XVI, con el estilo herreriano.

### 3.5.2. Tipología de las Cimentaciones en el Renacimiento

En esta época las cimentaciones pilotadas se volvieron mucho más frecuentes. En los textos se recomendaba esta tipología para cualquier situación y se daban reglas empíricas para determinar sus dimensiones. En líneas generales, no se nota una gran diferencia con la época anterior, los pilotes tenían aproximadamente las mismas dimensiones, disponían de azuches metálicos y estaban hincados de la misma forma.

Pero las cimentaciones superficiales también estaban muy presentes. El constructor empezaba siempre estudiando esta posibilidad, pero se debía estar seguro de la capacidad portante del terreno, y la dificultad para llevar a cabo una auscultación en profundidad del mismo hacía que se

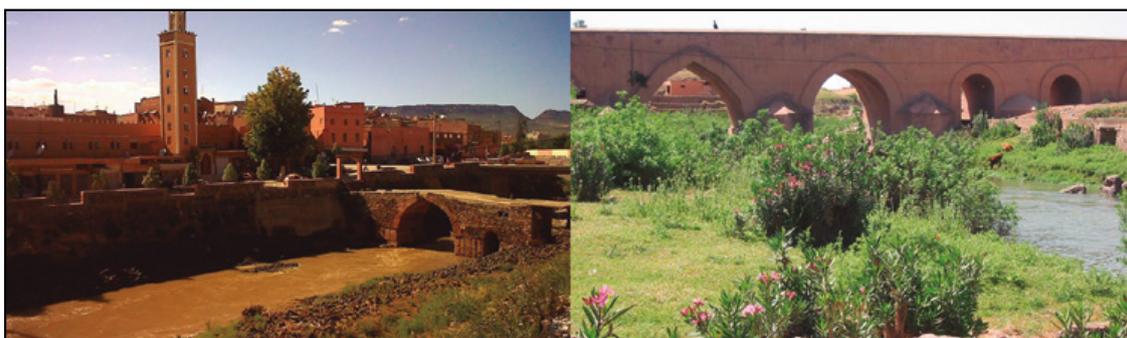


Figura 15. Puentes del Mulay Ismail sobre el valle (oued) Om Rabih en . Khénifra y Kasbah Tadla.

recurriera a la construcción de pilotes para evitar el riesgo de que se produjeran daños por fallos en la cimentación.

Los textos y la abundante documentación arqueológica del siglo XVI enseñan mucho sobre las técnicas de cimentación empleadas. Dichas técnicas estaban caracterizadas por el empirismo, casi total, y por una gran diversidad. El constructor conocía, en general, los medios para actuar cuando el suelo era de mala calidad, aunque el problema esencial era la identificación previa del terreno.

En cuanto a las protecciones contra las socavaciones construidas durante la obra, los textos no aportan casi nada, salvo en lo referente a trabajos efectuados durante restauraciones. Sí que se generaliza el criterio de disponer tajamares de forma semicircular aguas abajo de las pilas para mejorar la resistencia frente a la socavación

### 3.6. Siglo XVIII

El siglo XVIII supone un cierto avance en la construcción de puentes en Europa. También se produce un gran impulso en la regeneración de los caminos existentes. En España, por ejemplo, durante el reinado de Fernando VI se proyecta lo que se podría considerar el primer plan de carreteras, encargado a Bernardo Ward, artífice también de la concepción de un sistema radial de carreteras.

Hasta mediados del siglo XVIII la evolución en la construcción de puentes había sido retrospectiva, es decir, inspirada en las formas y proporciones de la Antigüedad, principalmente romana, aunque con algunos cánones ornamentales barrocos o neoclásicos. La única gran innovación en la primera mitad del siglo XVIII es la aparición de un nuevo tipo de cimbra a base de polígonos inscritos en la bóveda, que permitía un ahorro considerable de material, aunque a costa de una excesiva deformación.

Sin embargo, en la segunda mitad del siglo se produce un nuevo giro en la historia de Occidente, con el desarrollo de los trabajos experimentales y la aparición de un nuevo espíritu analítico, encarnado en la figura del gran ingeniero francés J. R. Perronet, primer director de la recién creada “École de Ponts et Chaussées”. Se inicia, por tanto, un período de grandes progresos en la construcción de puentes de fábrica, y sobre todo en su concepción. El gran responsable de este avance fue indudablemente Perronet, gracias a su actividad docente, con la cual aseguraba la transmisión sistemática de sus descubrimientos, y a su experiencia práctica, con la construcción de más de una veintena de puentes. Las mejoras de Perronet en la construcción de puentes fueron revolucionarias, alcanzando el arco de sillaría su perfección.

Como resultado de todos estos progresos, en España se construyen innumerables puentes de fábrica, cada vez con una técnica más perfeccionada. El desarrollo de los Canales Imperiales de Aragón y Castilla colaboró sin duda en el resurgir de las construcciones de puentes.

Por su parte en Marruecos no se produjo una evolución notable en la construcción de puentes, sumido como estuvo el territorio en sucesivas luchas por la sucesión al frente del Reino.

#### 3.6.1. Tipología de las Estructuras

Las principales características estructurales de esta época se basan en las innovaciones de Perronet. Éste observó que

en los puentes de varios vanos con arcos idénticos los empujes horizontales entre bóvedas adyacentes se autoequilibraban sensiblemente. De esto dedujo que era posible reducir considerablemente el espesor de pilas y la flecha de los arcos, modificando necesariamente para ello el proceso de ejecución. Se abandonó la tradicional técnica del descimbrado vano a vano, para realizar la construcción completa sobre la cimbra y descimbrar una vez completadas todas las bóvedas.

A pesar del encarecimiento que suponía la utilización de estas cimbras y de los estribos, se conseguía un importante ahorro de material, originado por el aligeramiento de las pilas, (que pasaron a espesores de hasta 1/10 de la luz libre), y el aumento del rebajamiento, (relación flecha/luz), llegando a 1/10 e incluso 1/15, con lo que el volumen de piedra de talla se reducía tanto en el arco como en los tímpanos.

Por otra parte, la disminución de la anchura de las pilas presentaba ventajas hidráulicas, ya que al disminuir la velocidad del agua se disminuían los riesgos de socavación, y ventajas estructurales, puesto que la construcción era más flexible y al disminuir el momento de vuelco por empujes transversales hidráulicos se mejoraban las condiciones de trabajo de la cimentación.

Los diseños de las bóvedas se conseguían gracias a la experiencia, o con ayuda de ensayos en modelos reducidos, los cuales servían para definir las directrices adecuadas de los arcos y los mecanismos de rotura asociados a cada geometría e hipótesis de carga adoptada. Las bóvedas carpanelas, en piedra o ladrillo, fueron las más utilizadas.

La ornamentación era prácticamente la misma de épocas anteriores. Normalmente, las boquillas de las bóvedas no sobresalían del tímpano, es decir, estaban enrasadas con él. Por otra parte, el parapeto se construía con impostas y albardillas semejantes, sobresaliendo del pretil.

Todo esto llevó hacia puentes más seguros, con mejores condiciones de circulación, al eliminarse definitivamente el lomo de asno de la Edad Media. También se buscaba el trazado ortogonal al cauce, evitándose los quiebrros en planta medievales.

Como ejemplo de esta época se pueden citar entre otros: el Puente largo de Aranjuez, obra monumental de 300 m de longitud y 8 m de anchura, con 25 arcos de medio punto de más de 8 m de luz cada uno, el Puente de Toledo, obra de Ribera, de características barrocas, con 9.45 m de anchura y 9 arcos iguales en la parte central, de 11.50 m de luz y con apartaderos a modo de balconcillos.

#### 3.6.2. Tipología de las Cimentaciones

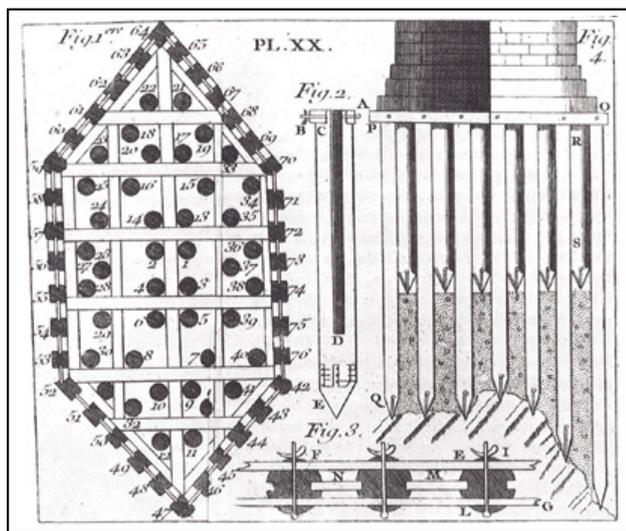
Desde principios del siglo XVII, se aprecia un cambio importante en la mentalidad y en las técnicas empleadas. Las ideas de la época motivaron un incremento considerable en el número de pilotes fabricados. Además, para proteger la pila contra las socavaciones, se hinca un recinto de pilotes y de tablestacas, que se rellena con hormigón.

Como novedad de la época también hay que mencionar el establecimiento de normas muy precisas para la construcción de cimentaciones sobre pilotes. Sin embargo, la gran incertidumbre del conocimiento previo de las características del suelo en profundidad no había desaparecido, ya que no se había descubierto ningún instrumento capaz de aportar datos sobre el mismo.

En esta época aparece la “losa”, una nueva forma de cimentación aparentemente desconocida y orientada

fundamentalmente a luchar contra la socavación, estabilizando los fondos.

En estos años surgen academias en diversos países que dictan normas y recomendaciones, provocando una cierta homogeneización de las técnicas de cimentación. Además, el control de los presupuestos y gastos tendía siempre a imponer la técnica más segura, con lo cual no es sorprendente que las cimentaciones sobre pilotes fueran la técnica más empleada a finales del siglo XVIII, con la aplicación de modelos casi estereotipados.



**Figura 16.** Cimentaciones sobre pilotes.

Como técnica típica cabe mencionar la utilización de pilotes con azuches metálicos, con cuatro lengüetas e hincados hasta el estrato duro, con una densidad de 3 a 5 pilotes por metro cuadrado. Sobre los pilotes se ataban maderos horizontales perpendiculares al curso del río. Estos maderos soportaban un suelo de madera sobre el cual estaba puesta la mampostería.

La lucha contra la socavación se plantea por primera vez desde el mismo momento de la construcción. De esta forma surgen los “zampeados”, constituidos por un recinto lleno de hormigón o escolleras, para proteger de la erosión los arranques y el fondo del lecho. El recinto podía ser el contorno exterior utilizado durante la construcción y conservado para la ocasión o uno hincado especialmente y atado al sistema de pilotes. En el caso de las cimentaciones superficiales, el zampeado podía estar atado a la parte baja de la propia pila.

También se emplean por primera vez en ésta época como procedimiento de cimentación, los cajones abiertos. Eran cajas de madera sin fondo ni tapa, construidos en la orilla, remolcados hasta las pilas y sumergidos después.

Todas estas reformas afectaban únicamente a las grandes obras que estaban a cargo del estado. Pero no se debe pasar por alto la ausencia de evolución de las técnicas en las obras que no tenían gestión pública.

### 3.7. Siglos XIX y XX

Durante el siglo XIX se producen grandes innovaciones técnicas y se mejoran los procesos constructivos, gracias al nuevo gran desarrollo industrial. La invención de la máquina de vapor y, consecuentemente, la aparición del ferrocarril, dan un fuerte impulso a la red de infraestructuras

en España. Se construyen vías de ferrocarril, nuevos tramos de carreteras y se incrementa espectacularmente la construcción de puentes.

El patrimonio de puentes se incrementa tanto en cantidad como en calidad y diversidad de tipologías. Los puentes se diseñan y se construyen mejor que en los siglos anteriores, porque hay un mejor conocimiento de los materiales y de su comportamiento. Con la revolución industrial aparece un nuevo material constructivo, el hierro, que se aplica por primera vez a la construcción de puentes y que da lugar a nuevas tipologías.

En el año 1799 se funda en España el Cuerpo de Ingenieros de Caminos y, en 1802, la Escuela de Ingenieros de Caminos. Así se crea un grupo de técnicos especializados, cuyos conocimientos motivan la elaboración de proyectos y presupuestos más racionalizados y sistematizados, llegándose a crear el primer catálogo de modelos oficiales de puentes.

Durante el siglo XIX conviven los puentes de fábrica tradicionales con los nuevos puentes de hierro. Por otra parte, se comienzan a utilizar los morteros artificiales, y aparece el cemento Portland. En Francia y Bélgica se mantuvo la tradición constructiva de sillería y ladrillo, mientras que en Alemania e Inglaterra, así como en España, fueron aplicándose cada vez en mayor escala estos nuevos materiales.

También en esta época se perfeccionan los métodos de encaje de la bóveda, según dos técnicas; la estática gráfica y la resistencia de materiales.

Séjourné influyó mucho en el apogeo de los puentes de fábrica durante el siglo XIX. Estos puentes eran aún los más utilizados debido a su sencillez, resistencia y al escaso mantenimiento que precisaban. Sin embargo, desde principios del XX, estos puentes empezaron a sufrir la competencia de los metálicos, y más adelante de los de hormigón armado, que finalmente dominaron en el campo de las grandes bóvedas a partir de los años veinte. A pesar de ello, los puentes de fábrica seguían siendo los más utilizados para la construcción de puentes de ferrocarril debido a su alta rigidez.

Baste como ejemplo mencionar que el propio Séjourné participó en la construcción de las líneas de ferrocarril que se hicieron en Marruecos durante el Protectorado Francés a principios del s.XX, diseñando algunos de los viaductos de fábrica que se construyeron a tal efecto.

La desaparición de los canteros y el elevado costo de los materiales y de la mano de obra influyeron en la progresiva desaparición de los puentes de fábrica. Al finalizar la Segunda Guerra Mundial los puentes arco eran construidos con hormigón, desapareciendo la sillería completamente a partir de 1950.

#### 3.7.1. Materiales

Los conocimientos desarrollados por los romanos para la elaboración de cemento natural, tras la caída del imperio se perdieron durante muchos siglos. El cemento hidráulico natural no fue redescubierto hasta finales del siglo XVIII; y ya en el s.XIX se patenta el cemento Portland.

Una vez dominada la técnica de confección y puesta en obra del hormigón, éste se extendió rápidamente y fue configurándose como un excelente material utilizable con ventaja no sólo en la construcción de cimentaciones y rellenos resistentes, sino en la realización de elementos estructurales principales como las bóvedas y las pilas, dando lugar finalmente al abandono de la construcción de nuevas obras de fábrica.

### 3.7.2. Tipologías de las estructuras

Los puentes de fábrica del siglo XIX se caracterizan por su mayor ligereza y esbeltez respecto a los de épocas anteriores.

Las bóvedas se rebajan hasta alcanzar relaciones flecha/luz de hasta 1/12 y se alcanzan luces muy notables precisándose menor espesor de pilas en el interior del cauce lo cual contribuye en un mejor comportamiento desde el punto de vista hidráulico y a la consiguiente reducción de los empujes del agua y de los temidos efectos de la socavación durante las avenidas.

En los puentes de gran luz, con el objeto de reducir peso muerto sobre la bóveda y obtener un alzado de apariencia menos opaca, se aligeran los tímpanos transversalmente hasta llegar a ser sustituidos completamente por arcadas que apoyan en la bóveda principal. También se realizan puentes con aligeramientos longitudinales, que permiten además el paso de canalizaciones.

Se construyen algunos puentes con bóvedas triarticuladas, solución estructural que facilita el centrado de la línea de empujes en el espesor del arco, al obligar su paso por los arranques y la clave, permitiendo un adecuado control de su comportamiento.

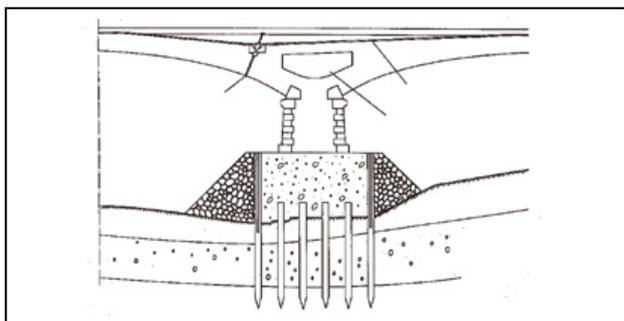
Desde el punto de vista estético los puentes se caracterizan además, en general, por su sencillez y por lo bien trabajada que está su sillería, eliminándose los detalles superfluos. Los tajamares suelen tener forma semicilíndrica y van rematados en su coronación por sombreretes semicónicos.

### 3.7.3. Tipologías de las cimentaciones

La tipología de las cimentaciones de este periodo viene marcada por el empleo del hormigón. Las excelentes propiedades de este material, su durabilidad y la facilidad que supone su puesta en obra (incluso bajo el agua), van imponiendo el uso del hormigón en la construcción de las cimentaciones tanto en las superficiales como en las profundas. Esto trae consigo apreciables cambios en la tipología de las cimentaciones precedentes. Deben citarse los siguientes:

- Substitución de las bases de escollera por macizos de hormigón vertido en el interior de un recinto de tablestacas de madera.
- Supresión del emparrillado de madera de atado de las cabezas de los pilotes por un encepado de hormigón en masa vertido en el interior de un cajón sin fondo.

En cualquier caso, es una constante la disposición de taludes de escollera como protección de la cimentación contra los efectos de la socavación. En la figura se muestra una cimentación típica en el siglo XIX.



**Figura 17.** Cimentación típica con pilotes de madera y encepado de hormigón en masa a finales del s.XIX.

Otras técnicas de cimentación que surgen a finales del siglo XIX son las basadas en el empleo de cajones de aire comprimido. Los cajones estaban generalmente constituidos por una chapa de acero de forma cilíndrica u oblonga de 4 a 10 metros de altura. Estas estructuras auxiliares disponían de una cámara de trabajo de unos 2 metros de alto, en donde se llevaban a cabo las labores de excavación a una presión superior a la del agua circundante. La cámara de trabajo se rellenaba finalmente con hormigón ciclópeo o con escollera unida con cal hidráulica.

## 4. BIBLIOGRAFÍA

[1] Martínez, J.L... [et al.]. (2003). *Monografía Sobre el análisis estructural de construcciones históricas de fábrica*. Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P.M.

[2] Martín-Caro, J.A... [et al.] (2001). *Caracterización estructural de los puentes arco de fábrica de la red ferroviaria*. Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P.M.

[3] Jouret, A. (1946). *Grands constructeurs: paul séjourné (1851-1939)*, Technica n° 76, pp. 3 a 15. (Disponible en <http://clio.ish-lyon.cnrs.fr/patrons/AC000007468/AC000007468Doc367.pdf>).

[4] Ribera, J.E. (1930). *El Ferrocarril de Tànger A Fez*. Revista de Obras Públicas. tomo I, pp. 297-303.

[5] Ribera, J.E (1925). *Puentes de fábrica y de hormigón armado*. Tomo I, Generalidades, muros y pequeñas obras. pág. 323.

[6] León González, J. (2005). *Notas para una historia del hormigón estructural*. S.L.: Ud. Hormigón Estructural. ETSICCP. UPM.

[7] Fernández Casado, C. (2008). *Historia del puente en España. Puente romano*. Instituto Eduardo Torroja. CSIC.

[8] Torres Balbás, L. (1940). *El Puente de Guadalajara*. Madrid: Al-Andalus. vol. V, pp. 449-458.

[9] Pavón Maldonado, B. (2010). *El arco de medio punto en la arquitectura árabe occidental*. Artículo inédito.

[10] Zielhofer, F. (2000). Palaeoenvironment and Morphodynamics in the Mid-medjerda Floodplain (Northern Tunisia) Between 12000 and 2000 BP: Geoarchaeological and Geomorphological Findings. *Alluvial archaeology in Europe*, 18-19, Leeds. Howard A.J., Macklin M.G., Passmore D.G.

[11] Martínez Fernández, B. (1997). Convenio para la elaboración de un manual de inspección y evaluación de daños en puentes de fábrica de piedra. CEDEX.

## 5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores, POC-TEFEX, de la Comisión Europea (Fondos FEDER) la financiación del proyecto TTIGEM, en cuyos trabajos se enmarca este artículo. Igualmente agradece la colaboración de SECEGSA, entidad que junto al CEDEX ha desarrollado el proyecto TTIGEM.