

© Manuel Durán Fuentes

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.  
Universidad de A Coruña  
[casaneve@mundo-r.com](mailto:casaneve@mundo-r.com)

Publicado en:

## Nuevos Elementos de Ingeniería Romana

III Congreso de las Obras Públicas Romanas. Astorga 2006  
Junta de Castilla y León - Colegio de Ingenieros T. de O. P.  
TRAIANVS © 2006 - <http://traianus.rediris.es>

## 1. Introducción

La ingeniería romana tuvo un gran desarrollo en la construcción de puentes, obras eminentemente utilitarias pero que, como ya apreció el ingeniero francés Perronet en el siglo XVIII, también sirvieron para utilizarlos como símbolos del Imperio y una exaltación de la *maiestas imperii* y la *publica magnificentia* del pueblo romano. Ha sido y es una obra singular con alto coste económico y exigencias técnicas que hace inevitable la presencia de personal experimentado con amplios conocimientos constructivos y también estructurales. La ingeniería romana, al cumplir estos requisitos básicos, pudo construirlos de manera sólida y estable, sin concesiones a la ligereza y con una clara intención de que durasen eternamente –como el propio imperio– y que el paso del tiempo ha convertido en paradigmas de buena construcción. Un ejemplo se constata en el puente de Alcántara cuyo arquitecto constructor *Caius Iulius Lacer* dejó reflejada su intención en una inscripción en la que se lee que duraría “por siempre en los siglos del mundo”.

En anteriores congresos he desarrollado el estudio de la construcción de los puentes romanos de *Hispania*, así como la sistematización de las características o singularidades que nos permiten reconocerlos. Hasta hoy se han identificado treinta y seis puentes, la mayoría contruidos con sillería de piedra que ayuda mucho a reconocer su identidad. El uso de otros materiales como el hormigón, la mampostería de lajas o granito (*opus vittatum*) en seco u ordinaria, el ladrillo (*opus latericiae*) o una mezcla de estos materiales, dificulta su identificación pues carecemos de los estudios constructivos sistemáticos pertinentes. Nos pueden parecer pocos pero debemos considerar tres cuestiones: la primera es que muchos han desaparecido, sobre todo en la vertiente oriental de la península por el régimen torrencial de la mayoría de sus ríos; la segunda es que originalmente ya se construyeron relativamente pocos puentes de piedra porque en los trazados viarios se trataba de evitar los cruces de los cursos de agua y además se pudieron ejecutar con materiales perecederos como la madera y otros serían simples vados; y la tercera es que se trata de un número provisional que crecerá en el futuro con nuevas obras, sobre todo de pequeño tamaño, posiblemente contruidos con una menor calidad, que se irán incorporando gracias a las aportaciones de nuevos estudios y a la revisión crítica de los ya realizados.

## Estudio sobre las bóvedas de los puentes romanos

En esta ocasión presento algunos detalles constructivos observados en las bóvedas de algunos puentes romanos de *Hispania* y de otros territorios del antiguo imperio, que reflejan el amplio y correcto conocimiento de su funcionamiento, con soluciones constructivas que hoy entendemos y podemos explicar gracias al desarrollo del cálculo estructural de los últimos doscientos años. Los ingenieros del XIX (todavía Sejourné a finales del XIX estableció este tipo de fórmulas parecidas a las que manejaron los maestros medievales) y de inicios del XX solo dispusieron de unas pocas y sencillas fórmulas experimentales que les permitían dimensionar sus bóvedas y de la estática gráfica para comprobar su estabilidad. Los arquitectos romanos posiblemente solo dispusieron de lo primero y de una amplia experiencia constructiva como se comprueba por los detalles constructivos que vamos a exponer a continuación.

## 2. El funcionamiento de un arco

El arco es un artificio constructivo compuesto por dovelas que al colocarlas de una determinada forma se consigue la estabilidad del conjunto por la simple fuerza de la gravedad que las hace trabajar sólo a compresión y superar el vacío bajo ellas desprendiéndose de su materialidad. Es uno de los grandes logros constructivos del hombre a pesar de ser, en palabras de Félix Cardellach, una «*estructura muerta por carecer de la vitalidad elástica que constituye el privilegio de las obras birresistentes*». Logra el prodigio de cubrir el espacio con piezas pequeñas que constituyen, en palabras de Eduardo Torroja, «*el mayor invento tensional del arte clásico*». Las estructuras arqueadas siguen impresionando al hombre que ha tardado bastante en acostumbrarse a su fenómeno resistente, a su extraordinaria capacidad para adaptarse a los movimientos de las cepas y para resistir sobrecargas mayores a las previstas, abriendo y cerrando grietas que no son en sí mismas dañinas para la estructura mientras no se forme un número de rótulas –articulaciones entre dovelas– que la conviertan en un mecanismo. La forma es, por tanto, la principal característica del arco pues gracias a la singular colocación de las dovelas y a la compresión mutua entre ellas traslada, a través de su masa, las cargas hasta la cimentación.

## MANUEL DURÁN FUENTES

El estudio de estas estructuras, desde el punto de vista mecánico, es complejo, pero trataremos de aproximarnos a su funcionamiento para entender la grandeza constructiva alcanzada por la ingeniería romana en sus puentes abovedados.

Las tres condiciones que debe satisfacer una estructura es que sea rígida, que sea resistente y que sea estable; la primera es evidente que los arcos de fábrica la cumplen y la segunda por medio del cálculo conocemos que las tensiones a las que se ve sometido son bajas con respecto a las

que teóricamente pueden soportar. Es la tercera la que se debe tener en cuenta en este tipo de estructura y por donde vamos a comenzar.

Si colgamos una cadena de sus extremos observamos que adopta una curva denominada catenaria; pues bien es ella la que nos permite la primera aproximación a la estabilidad de un arco: el inglés Hooke propuso hacia 1670 a la catenaria como figura ideal de un arco estable pues «del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así pero invertido se sostendrá el arco rígido».

*Fig. 1. Catenaria de una cadena sostenida por sus extremos.*



Unos años más tarde Gregory también plantea que «la verdadera y legítima forma de un arco o fornix 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». Esta sencilla afirmación constituye el teorema fundamental de la mecánica estructural, cuya demostración tuvo que esperar hasta el siglo XX, con la teoría plástica, gracias a la cual se comprueba que si el ingeniero estructural puede encontrar una forma de sostenerse en pie, sin duda la bóveda también lo hará.

Estos trabajos de Gregory inspiraron la solución de Poleni, empleando la catenaria, para responder en 1748 de la segu-

ridad de la cúpula de S. Pedro, que mostraba numerosas grietas meridionales que ascendían desde la base hasta casi la coronación. Consideró la estabilidad de un arco bidimensional formada por dos gajos que se apoyaban mutuamente en la coronación. Calculó el peso de un gajo dividiéndolo en 16 segmentos. Después ensartó los 32 pesos en un hilo flexible, cada peso en proporción a un segmento. De esta manera experimental encontró la forma de una catenaria que superpuesta al dibujo de los dos gajos se encontraba dentro de los límites de la fábrica, por lo que dedujo que la cúpula hipotéticamente dividida era estable y que como consecuencia la cúpula original, agrietada o no, también era estable.

Estudio sobre las bóvedas de los puentes romanos

El brillante análisis de Poleni apenas tuvo consecuencias posteriores y solo en la mitad del siglo XIX reaparece su método con catenarias para verificar la estabilidad de las estructuras. Este procedimiento fue empleado por Gaudí, que puede considerarse como el último exponente de esta tradición.

Fig. 2. Dibujo de Poleni de la cúpula de la basilica de San Pedro en Roma.

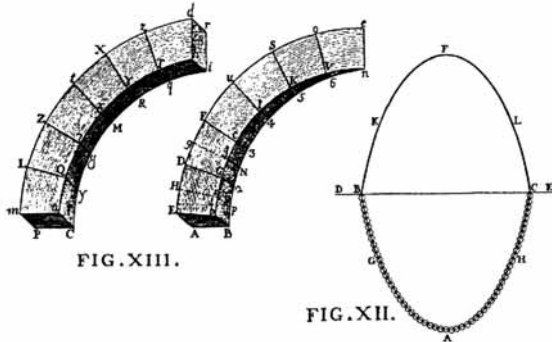


Fig. 3. Pintura de Gaudí sobre una foto invertida del modelo funicular de la iglesia de la Colonia Güell.

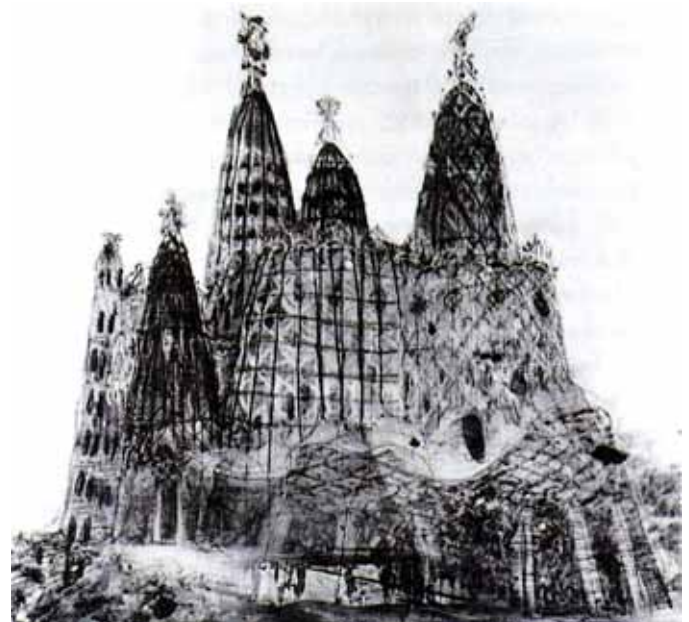
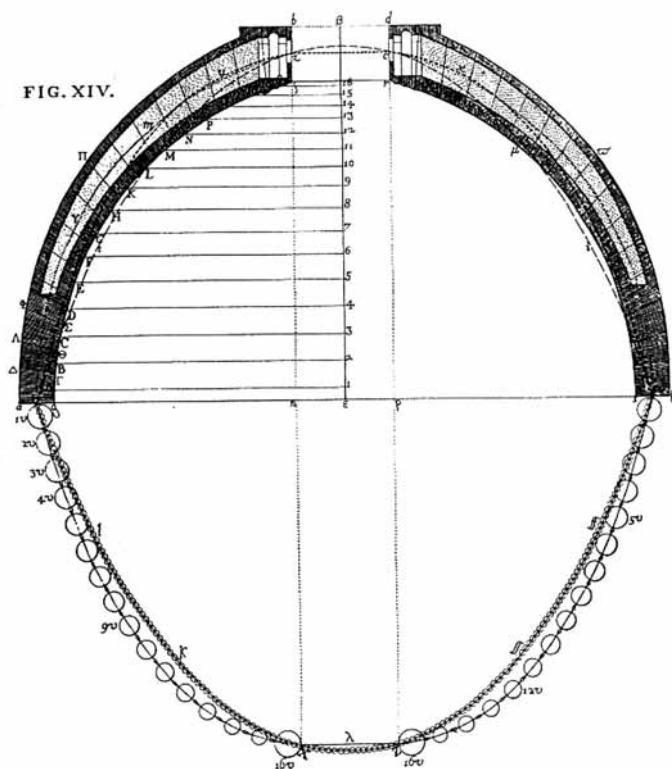


Fig. 4. Maqueta de funiculares de la iglesia de la Colonia Güell realizada por Gaudí.



En nuestra modestia también hemos utilizado este procedimiento como auxiliar en algún informe sobre la estabilidad de un puente antiguo para el paso de una determinada sobrecarga o en algún proyecto de reparación y consolidación. La fotografía adjunta representa la visualización de una catenaria sometida a las cargas muertas de la bóveda derecha del puente medieval de Vilanova en la villa de Allariz (Ourense). Como se puede observar es posible alojar en su interior una catenaria, por lo que podemos concluir que es estable.

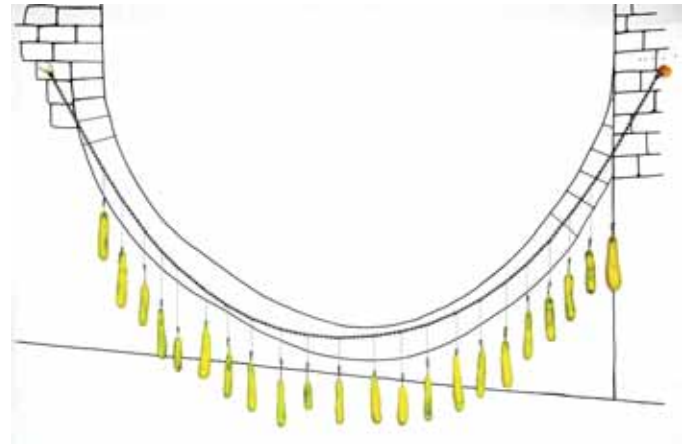


MANUEL DURÁN FUENTES

Fig. 5. Arco izquierdo del puente de Vilanova en Allariz (Ourense).



Fig. 6 Maqueta funicular de las cargas muertas del arco izquierdo del puente de Vilanova.



Si insertamos entre las cargas una puntual en el cuarto de la luz –es la situación más desfavorable– se obtiene otra catenaria que, como podemos apreciar, también es posible alojarla en el interior de la rosca de la bóveda.

Si se invierte la cadena colgante adopta la curva antifunicular que a partir del XIX conocemos por el nombre de línea de empujes o curva de presiones, representación gráfica del equilibrio de las cargas.

Fueron varios los ingenieros europeos –Gertsner en Alemania, Mery en Francia y Moseley en Inglaterra– los que entre los años 1830-1840 concretaron el concepto de línea de empujes o curva de presión como el lugar geométrico

de los puntos de paso de la resultante de las fuerzas en cada plano de separación de las dovelas. Su representación gráfica permite visualizar el traslado, a través de la bóveda, de los esfuerzos de compresión generados por las cargas soportadas por el arco hasta sus apoyos o estribos.

Gracias a la representación gráfica de esta línea de empujes se conoce el empuje del arco en los estribos y con ayuda de las sencillas fórmulas de la física estática se dimensionan los estribos para que sean estables. Pero esta representación solo es posible obtenerla si fijamos de antemano tres puntos de paso de la línea de empujes por el arco, ya que en el planteamiento teórico de la estabilidad de un arco el

Fig. 7. Maqueta funicular de las cargas muertas y una carga puntual en el  $1/4$  de la luz del arco izquierdo del puente de Vilanova.

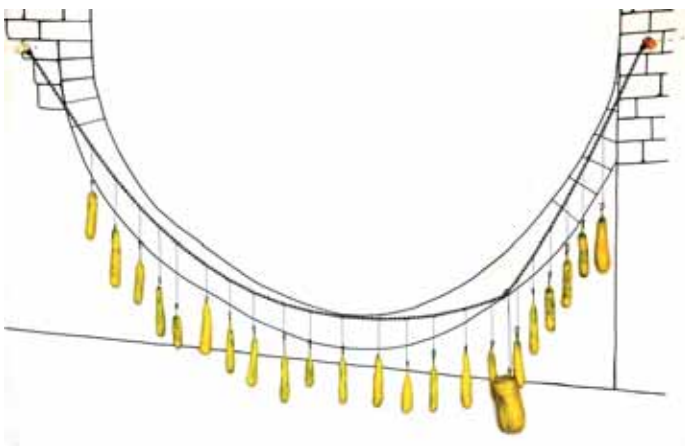


Fig. 8 Vista invertida de la maqueta funicular del arco izquierdo del puente de Vilanova.

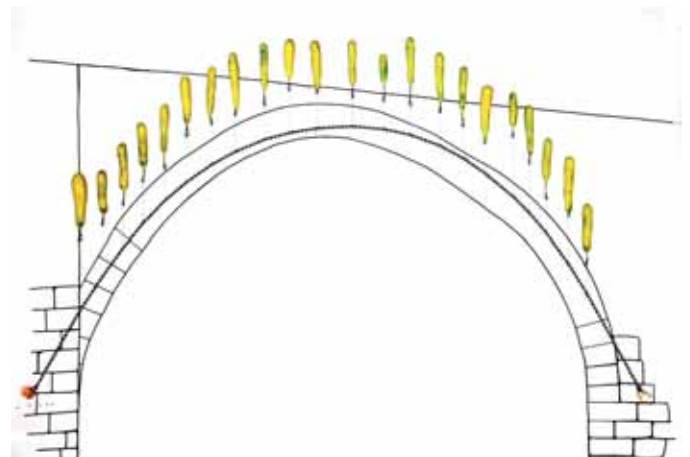
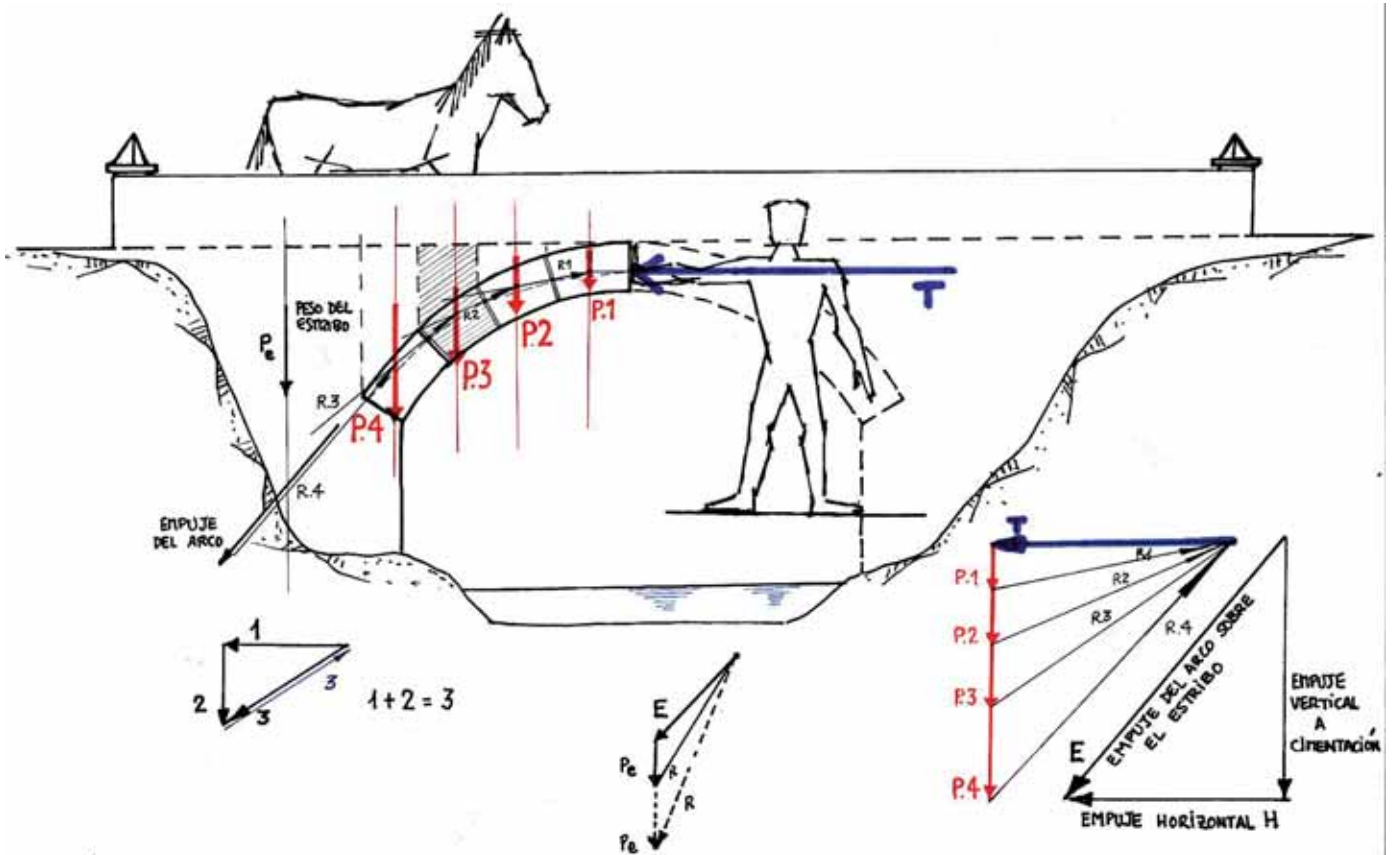


Fig. 9. Croquis de las cargas y reacciones en un puente.



número de incógnitas –seis– supera a las tres ecuaciones que nos proporciona la física estática. Si esta hipótesis inicial no se podría resolver la cuestión; esto representa que hay muchas soluciones posibles y que por lo tanto desconocemos la ‘verdadera’ línea de empujes. Los ingenieros del XIX no pudieron avanzar en la resolución de este problema de localizarla pero consideraron, de forma axiomática, que era suficiente hallar una línea de empujes contenida en el tercio central para asegurar que la bóveda era estable.

Fue la moderna teoría plástica –sobre todo las contribuciones del profesor inglés Heyman– la que demostró la inutilidad de la afanosa búsqueda de la ‘verdadera’ línea de empujes pues no es necesario encontrar el estado real de la bóveda; simplemente con encontrar una línea de empujes en equilibrio con las cargas y sobrecargas que esté alojada en el arco podemos decir que la bóveda es segura (estable). La fuerza de esta afirmación radica en el hecho de que solo es necesario encontrar una forma de las

muchas posibles. Si el ingeniero es capaz de encontrar un estado de equilibrio –representado gráficamente por la línea de empujes– el arco también.

Cuando las condiciones de apoyo varían, bien por los empujes del arco o por el asentamiento de la cimentación, la única forma de adaptarse el arco –teniendo en cuenta que no resiste los esfuerzos de tracción, que su resistencia a la compresión es prácticamente infinita y que no hay deslizamiento entre las dovelas– es abriendo grietas, o lo que es lo mismo articulándose. Una rótula o articulación se forma cuando la línea de empujes se acerca al borde del dovelaje; a medida que se van formando rótulas la indeterminación de la ‘verdadera’ línea de empujes se va acotando –ya que ésta siempre pasa por la rótula– hasta su resolución en una única curva de presión cuando se forman tres rótulas. En este momento el arco es una estructura isostática en la que es posible hallar de forma precisa la línea de empujes en equilibrio con las cargas soportadas. Cuando se forma una rótula más el arco se arruina al convertirse en un mecanismo.

Fig. 10. Arco colapsado en la ciudad romana de Bosra (Siria):



### 3. La bóveda en los puentes romanos

Las bóvedas fueron empleadas por la ingeniería romana en la construcción de puentes con la maestría de quien ha comprendido su correcto funcionamiento estructural, consiguiendo no solo el fin constructivo sino también una indudable calidad estética. Utilizaron preferentemente el arco de medio punto, con menor intensidad la forma rebajada –alabada por los antiguos tratadistas y los primeros ingenieros civiles como Perronet– y ocasionalmente la forma acolmenada (un arco del puente de Rimini) o parabólica o de varios centros (recuperada por los ingenieros del XVIII) conservada en el puente de Voisson-la Romaine en el sur de Francia. El uso mayoritario del arco semicircular quizá lo justifique la creencia errónea de que los empujes llegaban a los arranques de forma tangencial a la curva, o sea vertical. Hoy sabemos que esta geometría no se ajusta a la curva antifunicular de las cargas permanentes, pero supieron construir los arcos semicirculares de modo que su comportamiento estructural fuese correcto gracias a algunas de las disposiciones constructivas que vamos a exponer. También emplearon las bóvedas circulares rebajadas que se ajustan mucho mejor a la curva antifunicular de las cargas permanentes de los puentes –por lo

que se necesita menos espesor de rosca para contenerla en su interior– pero que tienen el inconveniente de producir un mayor empuje horizontal en los estribos –la línea de empujes llega a ellos más horizontal– por lo que será necesario que sean de mayor tamaño para contrarrestarlo.

Aplicando el análisis límite desarrollado por Heyman a los arcos romanos, cuya estabilidad se establece en función de un coeficiente de seguridad definido por este autor como el cociente entre el espesor real y el estrictamente necesario para soportar en equilibrio las cargas muertas y el paso de una sobrecarga puntual conocida aplicada en el cuarto de la luz, siempre hemos obtenido resultados que nos indican la gran estabilidad de las bóvedas romanas a pesar de que las sobrecargas aplicadas son muy superiores a las habituales de aquellos tiempos. Siempre se ha cumplido que la línea de empujes pasa, de forma holgada, por el interior de la rosca. Se exponen a continuación algunos de los resultados obtenidos:

- **PUENTE DE ALCÁNTARA**
  - Arco mayor de 28,80 m de luz (carga de colapso 52 t).
  - Espesor de la bóveda: 1,60 m (rosca inferior), 0,50 m (rosca superior)
  - Espesor mínimo para arco estable: 0,77 m
  - Coeficiente de seguridad geométrico: 2,07

Estudio sobre las bóvedas de los puentes romanos

• PONTE BIBEI

- Arco mayor de 18,76 m de luz, el de mayor esbeltez de los puentes hispánicos (carga de colapso 24 t).
- Espesor de la bóveda: 0,90 m
- Espesor mínimo para arco estable: 0,52 m
- Coeficiente de seguridad geométrico: 1,73

• PUENTE DE PONTE DE LIMA

- Arco mayor de 11,60 m de luz para una carga de colapso 24 t.
- Espesor de la bóveda: 0,65 m
- Espesor mínimo para arco estable: 0,42 m
- Coeficiente de seguridad geométrico: 1,55

• PONTE DE PEDRA (PORTUGAL)

- Arco mayor de 9,46 m de luz para una carga de colapso de 30 t.
- Espesor de la bóveda: 0,70 m
- Espesor mínimo para arco estable: 0,39 m
- Coeficiente de seguridad geométrico: 1,79

Estos resultados pueden intuirse si se observan con detenimiento las bóvedas de los puentes romanos pues no se aprecian en ellas los giros entre dovelas o rótulas -provocados por la excentricidad del paso de la línea de empujes- que, por lo general, sus espesores han sido y son suficientes para alojar sobradamente en su interior las líneas de empuje producidas. No es el caso de los puentes medievales y posteriores donde es habitual ver estas articulaciones en su dovelaje, consecuencia de sus escasos espesores y de la aplicación de técnicas constructivas diferentes a las romanas, que confiaban su estabilidad a los aristones y descuidando la parte interior -en realidad casi una plementería- de menor espesor y peor calidad constructiva.

El acertado criterio de diseño, en cuanto a sus dimensiones, la correcta forma de su directriz y la buena calidad de construcción han hecho que los puentes romanos sea el ejemplo de una obra resistente y bien hecha, por lo que se podía ver en algunas carreteras españolas como el tráfico pesado era desviado hacia el puente romano, por ejemplo en el puente de Salamanca cuando todavía por él circulaban vehículos a motor. Creemos que la desaparición de puentes romanos fue debido mayoritariamente al fracaso de la cimentación en grandes avenidas y muy raramente al colapso de sus bóvedas por un incorrecto diseño o por no soportar las cargas actantes.

Fig. 11 Señal direccional en las cercanías del puente romano de Salamanca.



Este correcto funcionamiento de las bóvedas se debe a varias disposiciones constructivas:

- a) En primer lugar al espesor constante en toda la bóveda, a diferencia de las medievales donde los maestros canteros o bien por simple desconocimiento, por mayor atrevimiento técnico o por economía, confiaban su estabilidad a unos buenos y bien diseñados aristones -en las dovelas interiores redujeron el espesor a la mitad o menos de las boquillas- y la rigidez de los tímpanos.

Fig. 12. Espesor uniforme de una bóveda del puente de Alconétar (Cáceres).



## MANUEL DURÁN FUENTES

b) En segundo lugar a distintas soluciones para incrementar la estabilidad de las bóvedas o lo que es lo mismo, para facilitar el paso de las líneas de empujes por el interior de la fábrica:

*b.1)* Una de estas disposiciones constructivas fue macizar el interior de los tímpanos con materiales que colaboraban con la rosca de la bóveda en el paso de las cargas –líneas de empujes– hacia los estribos: Como sabemos los empujes de los arcos de medio punto salen de su fábrica por la parte inferior ya que llegan inclinados a las cejas. Confiaron en el hormigón en masa, en la sillería maciza o en ambos materiales a la vez, y menos en los materiales térreos compactados o simplemente vertidos, procedimiento este último habitual en los puentes medievales. Este macizado puede alcanzar los riñones del arco o llegar hasta la calzada, como puede verse en el puente turco de Göksu, en el que la sillería cubre la mitad inferior del arco mientras que la superior lo hace un relleno de hormigón con cal aérea (son visibles los huecos dejados para la recarbonación).

*Fig. 13. Relleno interior de sillería y hormigón de cal aérea en el puente Göksu (Turquía).*



Con esta disposición conseguían un segundo efecto favorable pues al ser los pesos específicos de estos materiales superiores al del relleno granular es mayor las cargas gravitatorias del relleno que al componerse verticalmente con el empuje horizontal, la resultante –el empuje del arco– resulta más vertical y por lo tanto con menor componente horizontal que es la peligrosa.

*b.2)* Una segunda solución consistió en la disposición de un dovelaje de buen espesor conseguido con dos rosas concéntricas, de tamaños uniformes o desiguales. Esta solución es frecuente en puentes galo-ligures como los conservados en el Val Quazzola y Ponci, en Italia; en *Hispania* podemos ver un dovelaje doble en las bóvedas del puente de Alcántara.

*Fig. 14. Doble rosca en el Ponte delle Fate (Italia).*



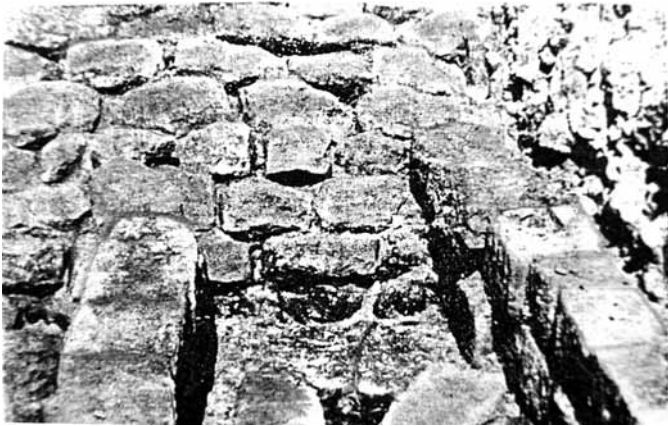
*b.3)* Durante las obras de reparación y consolidación efectuadas en 1888 en el Ponte Freixo (Ourense) pudimos ver otro procedimiento de refuerzo de las bóvedas por debajo de sus riñones que consistía en el simple arrimo de una segunda rosca de sillares.

*Fig. 15. Refuerzo interior con una segunda rosca en una bóveda del Ponte Freixo (Ourense).*





Fig. 16. Refuerzo con muros interiores longitudinales en una bóveda del puente de Ponte de Lima (Portugal).



b.4) Un sistema que no incrementaba el espesor de las rosas pero si el arriostamiento entre ellas y por tanto su rigidez fue el empleado en el tramo romano del puente de Ponte de Lima, redescubierto por Sousa Machado en 1961 durante las obras de restauración de los daños que ocasionó la crecida de 1957. Consiste en dos gruesas paredes levantadas hasta el nivel de los riñones en el interior de los tímpanos, que dividían el espacio entre tímpanos en tres compartimentos que rellenaron con tierra y piedras.

Un sistema idéntico se empleó en el Ponte Cestius de Roma en el que dos muros de sillería de travertino, dispuestos longitudinalmente en el relleno de los tímpanos, arriostaban la bóveda central con el trasdós de las dos bóvedas laterales más pequeñas. El espacio interior también quedaba dividido en tres espacios que fueron rellenados con un hormigón pobre de cal y grava menuda de cuarcita, travertino y mármol.

b.5) El empleo de dovelas de mayor tamaño en la zona baja de la bóveda constituye otro sistema empleado, por ejemplo, en las dos centrales del puente de Caparra en Cáceres y en Ponte de Chaves (Portugal). Desconocemos si este mayor tamaño también lo tienen las dovelas interiores, pero la uniformidad del espesor en toda la anchura nos inclina a pensar que así sea.

b.6) Un último sistema poco habitual pues solo conocemos un caso en un puente acueducto llamado de la Abadía en Vulci (Italia) consistió en hacer variable el espesor de la rosca, de mayor tamaño en la parte inferior del arco y menor en la zona de la

Fig. 17. Dovelas de mayor tamaño en la parte baja del puente de Caparra.



Fig. 18. Dovelas de mayor tamaño en la parte baja del puente de Chaves (Portugal).



clave, facilitando de este modo que los empujes inclinados de la bóveda pasasen por el interior de la rosca en la parte baja.

## MANUEL DURÁN FUENTES

c) En tercer lugar gracias a la ocasional mejora de la trabazón de las bóvedas con distintos sistemas que incrementaban su rigidez.

c.1) Un sistema singular fue la práctica de engatillados en las juntas de las dovelas para evitar el deslizamiento entre sí. Básicamente se conserva en dinteles adovelados o arcos planos y en contados edificios romanos del Imperio Occidental, como el Palacio de Diocleciano en *Spalato*, la actual ciudad de Split, una puerta de la ciudad española de *Tarraco* y en el teatro de Orange en Francia.

Fig. 19. Dintel adovelado con engatillado en Tarraco.



Son más frecuentes en zonas del antiguo Imperio Oriental y de Bizancio, heredero de la construcción que se realizaba al Este del mar Adriático, con todas sus singularidades. Es fácil verlos en construcciones bizantinas de Siria, en las llamadas Ciudades Muertas en los alrededores de Alepo, como la que existió en torno al Santuario de San Simón, así como en las posteriores construcciones otomanas.

En lo que respecta a arcos con dovelas engatillados solo conocemos los que tiene la bizantina Tumba de Teodorico en la ciudad de Ravena y los puentes de Villa del Río y Los Pedroches, ambos en Córdoba. Estos puentes han sido considerados tradicionalmente como romanos, pero la falta de otros ejemplos en todo el imperio y el hecho de que en esta zona estuvo bajo dominio de los Omeyas que procedían de Siria, nos ha hecho dudar que la fábrica conservada tenga tal origen y se trate de una reconstrucción con técnicas bizantinas

Fig. 20. Dintel adovelado del Santuario de San Simon (Siria)'.  
'



manejadas por alarifes árabes de un puente anterior del cual se conservarían la cimentación.

La singularidad del estribo de una bóveda sobre el dovelaje de un arquillo sostenidos ambos por un estrecho pilar, con precedentes en la construcción oriental bizantina, refuerza esta opinión.

Fig. 21. Arco con dovelas engatilladas del puente de Villa del Río (Córdoba).



El engatillado practicado en el plano de la junta es un recurso constructivo que evita el deslizamiento de las dovelas entre sí, cuando se mueven sus apoyos, por ejemplo durante un movimiento sísmico; si no posee engatillado este incremento de la luz provoca el descendimiento de las dovelas sin posibilidad de recuperar su antigua posición. Su existencia mejora la estabilidad bajo esas alteraciones y en el caso de tales movimientos incluso les permite volver a su posición original.

Por la distribución geográfica de los ejemplos conservados parece que su utilización esta unida a la posibilidad de sismos, como es el sur de España y en general toda la cuenca mediterránea.

- c.2) Otro sistema consiste en la disposición de juntas finas que aseguraban un buen contacto entre las dovelas y asegurar no solo una mejor resistencia de la fábrica, similar a la de la propia piedra, sino también una menor rigidez por el debilitamiento del mortero por el paso del tiempo que provocaría desplazamientos indeseados en las dovelas.

Las dovelas las han colocado siempre en seco, sin ripios ni mortero en las juntas, al igual que las piezas de las silleras -*opus quadratum*- incluso cuando se unían a macizos de hormigón. En cambio sí emplearon pequeñas cuñas con mortero de cal en las fábricas de mampostería o sillarejo, la *opus vittatum*. Los rejuntados con ripios que se ven en algún puente de *Hispania*, como el de Salamanca, Alcántara, Albarregas o Bibeí, son modernos posiblemente realizados con la idea equivocada de mejorar su conservación.

El rozamiento entre las piezas aparejadas en seco es lo que permite resistir los esfuerzos horizontales procedentes de los empujes de los arcos, de los rellenos de tierra o de los terremotos; vencido éste las fábricas se dañarían.

- c.3) La alternancia de hiladas de dovelas colocadas a soga y a tizón es una forma de trabar la bóveda poco habitual, pues son pocos los ejemplos que se conservan con esta disposición apreciable en las boquillas. En Italia hay varios puentes que la tienen (San Giorgio en Arsoli, di Cecco en Ascoli Piceno o el San Cono) mientras que en *Hispania* no conocemos que la disponga ninguno.

- c.4) Como ya se ha mencionado también trabaron las dovelas con grapas de madera con forma de doble cola de milano, aunque los puentes que conocemos en los que se aprecian este tipo de rigidizadores no son de *Hispania*, dos de ellos en Francia, Pont Ambroix y las bóvedas del puente acueducto de Pont du Gard (Paillet 2005, 58), uno en Italia, Tor di Valle en la Vía Ostiense cerca de Roma y el cuarto en Chemtou (Túnez). En todos ellos se conservan en las dovelas los huecos de alojamientos de este tipo de grapas de madera.

Fig. 22. Vista parcial de la boquilla aguas arriba del puente de San Cono (Italia).



## 4. Bibliografía básica

- ADAM, J.P. (1996). *La construcción romana. Materiales y técnicas*. León: Editorial de los Oficios.
- ALVARADO, S.; Durán, M.; Nárdiz, C. (1989). *Puentes Históricos de Galicia*. Santiago.
- BALLANCE, M.H. (1951). *The roman bridges of the Vía Flaminia*. Roma: The British School.
- CHOISY, A. [1873] (1999). *El arte de construir en Roma*. Madrid: CEHOPU-Instituto Juan de Herrera.

## MANUEL DURÁN FUENTES

- DURÁN FUENTES, M. (1996). “Puentes romanos peninsulares: tipología y construcción”. *Actas 1er Congreso de Historia de la Construcción*. Madrid.
- (2002). “Análisis constructivo de los puentes romanos”. *Actas del I Congreso: las obras públicas romanas en Hispania*. Mérida.
- (2003). “An endeavour to identify roman bridges built in former *Hispania*”. *Proceedings of the First International Congress on Construction History*. Instituto Juan de Herrera. Madrid.
- (2004). *La construcción de puentes romanos en Hispania*. Xunta de Galicia. Santiago.
- (2005). *La construcción de puentes romanos en Hispania*. 2ª Ed. corregida y aumentada. Xunta de Galicia. Santiago.
- FERNÁNDEZ CASADO, C. (1980). *Historia del puente en España. Puentes Romanos*. Instituto Eduardo Torroja. Madrid.
- GALLIAZZO, V. (1995). *I ponti romani*. Venecia: Edizione Canova.
- GAZZOLA, P. (1963). *Ponte Pietra a Verona. Ponti Romani. I-II*. Florencia: Leo S. Olschki Editore.
- GINOUVÉS, R., Martin, R. (1985). *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine*.
- HELLMANN, M.C. (2002). *L'Architecture grecque*. París: Editions A. et J. Packard.
- LUGLI, G. (1957). *La tecnica edilizia romana*. Roma: Presso G. Bardi Editore.
- MENDES PINTO, P. (1998). *Pontes Romanas de Portugal*. Associação Juventude e Património. Lisboa.
- O'CONNOR, C. (1993). *Roman Bridges*. Cambridge University Press.
- PERRONET, J.R.(2005). *La construcción de puentes en el siglo XVIII*. CEHOPU -Instituto Juan de Herrera. Madrid.
- VV.AA. (1991 b). “Puentes I”, “Puentes II” y Puentes III”. *Revista O.P.* Colegio de Ingenieros de caminos. Barcelona.