

ANÁLISIS CONSTRUCTIVO DEL PUENTE MAYOR DE SALAMANCA¹

JOSÉ MIGUEL ÁVILA JALVO

RESUMEN: Este artículo resume el informe sobre el puente Mayor de Salamanca realizado con motivo de las recientes obras de restauración llevadas a cabo en él. Contiene las características morfológicas y constructivas del tramo romano y de la prolongación moderna, vistas tanto desde los aspectos históricos como desde las comprobaciones mecánicas realizadas ahora. Se trata de explicar así su forma, su deterioro y su estabilidad.

ABSTRACT: This article is a summary of a report about the Mayor bridge of Salamanca made in the occasion of recent carried out works of restoration in him. It contains the morphologic and constructive characteristics of the Roman side and the modern prolongation, views as much from the historical aspects as from the verifications of stability made now. One is to thus explain its form, its deterioration and its stability.

PALABRAS CLAVE: Puente romano / siglo xvii / Salamanca / cálculo gráfico / historia de la construcción.

1 Este texto deriva de un informe del mismo título que me fue encargado a través de José María Cabrera. En mi primera visita al puente para realizar el informe, subí a la ciudad en busca de información documental y tropecé con el Museo de Historia de la Ciudad. Allí accedí a María José Frades, su directora, que tuvo la amabilidad de atender mis consultas y hacerme llegar buena parte de los textos que figuran en la bibliografía final y, sin los cuales, mi conocimiento del puente se habría limitado a una torpe visión técnica. Pedro Navascués, como es su costumbre para conmigo, me dejó algunos de los mejores libros y mis hijos Javier y Miguel Ávila Nieto han montado la documentación gráfica.

1. EL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PUENTE ROMANO

La importancia estratégica y funcional que la cultura romana dio a sus construcciones las hizo objeto de destrucción y, por ese mismo interés, volvieron a ser, frecuentemente, reconstruidas. Gracias a ese tejer y destejer disponemos hoy de una importante cantidad de restos en aceptable estado de conservación formando parte de obras posteriores. Pero es poco frecuente encontrar una obra romana prácticamente completa, como es el caso del puente de Salamanca².

Un motivo de su longevidad es la calidad constructiva, otro, el que formaba parte de una vía militarmente poco estratégica que no debió merecer la pena cortar para evitar el tránsito a ningún enemigo.

El puente pertenece a la Vía de la Plata y resuelve el cruce del Tormes en Salamanca. La importancia de ese antiguo camino rehabilitado por los romanos, unido a las notables crecidas del río, requirieron una construcción cuya anchura y solidez corresponde a la de los itinerarios principales³.

Durante la conquista militar, el puente empezaría seguramente siendo de madera⁴, y la importancia comercial del principal camino vertical del interior de la Península llevaría a reconstruirlo en piedra, posiblemente, tras alguna riada. La aparente tranquilidad del Tormes a su paso por la ciudad debió engañar a los primeros constructores ya que necesitó varias consolidaciones durante la época romana hasta quedar como hoy lo vemos. Pero, tras varios intentos, supieron dar cuenta de los problemas que planteaba el río⁵.

La luz más frecuente de los ojos es 9,50 m (32') y las pilas tienen un ancho de 2,50 m (8') arriba, en su unión con el arco, y 3,30 (11') abajo, en el suelo. Las séptima y octava son algo más gruesas⁶, posiblemente debido a la mayor profundidad del lecho en esa zona⁷.

2 "...los 14 arcos más cercanos [a la ciudad] y la mitad del 15 [de los 26 de que consta] son romanos." BENET, Nicolás. *Informe sobre el puente romano de Salamanca*. julio 1986, pág. 1.

3 "Las calzadas militares tenían de 4 a 6 m de latitud y las había enlosadas, afirmadas o simplemente explanadas. Sobre el Tormes [los romanos] construyeron el puente de piedra...", ALZOLA Y MINONDO, Pablo. *Historia de las Obras Públicas en España*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1994.

4 "Vense las ranuras donde se apoyó la cimbra (si no es que primitivamente tuvo maderaje en lugar de arcos) dispuestas con regularidad de 5 en 5 a cada lado de las pilas en su penúltima hilada". GÓMEZ MORENO, Manuel. *Catálogo Monumental de España. Provincia de Salamanca*. Valencia: Ministerio de Educación y Ciencia, 1967, pág. 46.

5 "...se sigue datando el puente a finales del I y ... era posterior a otro anterior ... entre Augusto ... y Trajano, al que se atribuyen reparaciones. En 1767 se encuentra ... una moneda de Antonino Pío ... y en 1853 ... otra de cobre del emperador Honorio, pudiendo fechar obras de reparación de esas épocas." Nota 2, pág. 2.

6 Dada la fisonomía, similar en todo al resto, no parece que este mayor tamaño tenga que ver con obras posteriores "Entre 1885 y 1889 el puente fue restaurado según proyecto del ingeniero Alfredo Mateos que afectaba ... a las pilas 7ª y 8ª...", CHÍAS, Pilar y ABAD, Antonio. *Puentes de España*. Madrid: FCC, 1994, pág. 31.

7 En la descripción del puente de hierro cercano, Saturnino Zufiaurre, su autor, cita las características del terreno: "...el lecho se compone de capas de arena y grava hasta llegar al terreno firme que ... resultó estar a 6 m. bajo el estiaje. [Tal firme] se compone de bancos de arenisca continuación de los que se ven al exterior, en la margen izquierda, que reúne excelentes condiciones para cimentar la obra", ZUFIAURRE GOICOECHEA, Saturnino. Puente sobre el río Tormes en Salamanca. En *Revista de Obras Públicas*, 1903, Madrid, pág. 80.

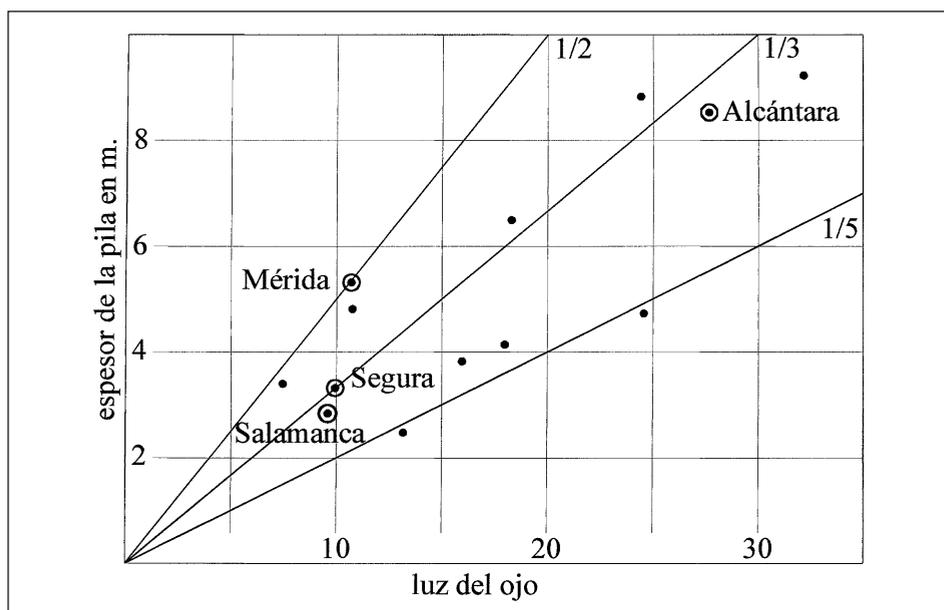


FIG. 1.—Relación entre ancho de pila y luz de ojo en algunos puentes romanos de Hispania.

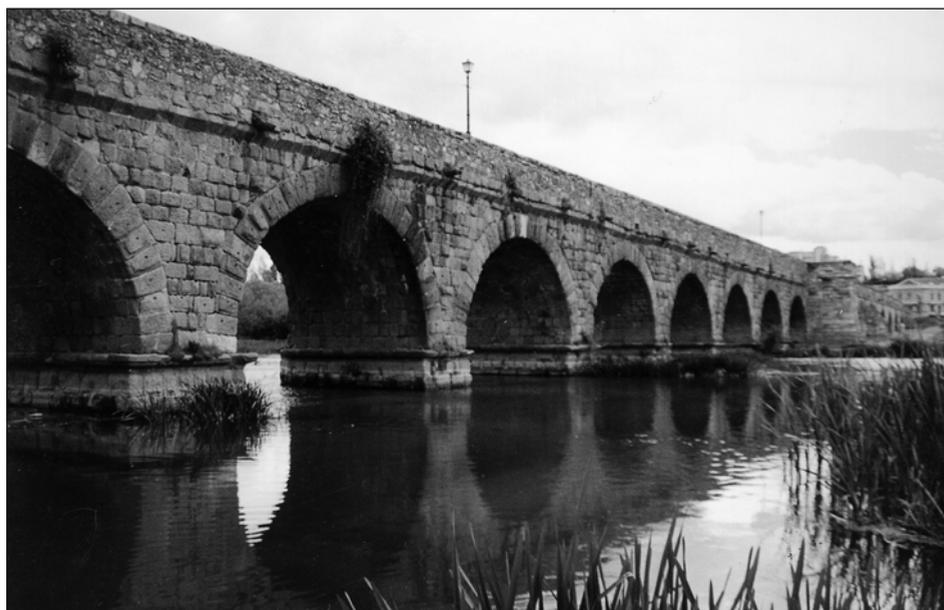


FIG. 2.—Puente Mayor de Salamanca. Cara situada aguas abajo.



En el suelo aparecen restos de una plataforma construida con piezas de granito que podría servir para reducir la socavación de las arenas arrastradas por los torbellinos y que fue usada en otros lugares, al menos, desde la época de Adriano⁸. Los romanos no se preocuparon, o no dieron con la solución, a los arrastres de terreno que producen tales remolinos que forman las pilas que ocupan el cauce, y que socavan las fundaciones; aunque en Salamanca, la baja relación entre el ancho de pila y la luz del ojo (Fig. 1) ha minorado este efecto⁹. Conocían la necesidad del tajamar delantero pero ignoraban la importancia

FIG. 3.—*Detalle de una pilastra. Se observa cómo la dovelas de los arcos impiden la traba de los sillares inferiores*



FIG. 4.—*Puente Mayor de Salamanca. Cara aguas arriba, con pilastras adosadas.*

del trasero –para cuya aparición faltaban aún diez siglos– para mitigar los remolinos de popa¹⁰. Construyeron lisa la cara de aguas abajo tanto en Salamanca (Fig. 2), como en otros lugares. En la cara de aguas arriba el puente tiene unas pilastras adosadas (Fig.3), mal llamadas contrafuertes¹¹, y que le confieren su fisonomía característica (Fig. 4). En alguna época se ha reducido la altura del puente como puede observarse bajo la cornisa superior, apreciándose que la hilada situada inmediatamente debajo de ella ha sido cortada por la mitad de su altura (Fig. 5).

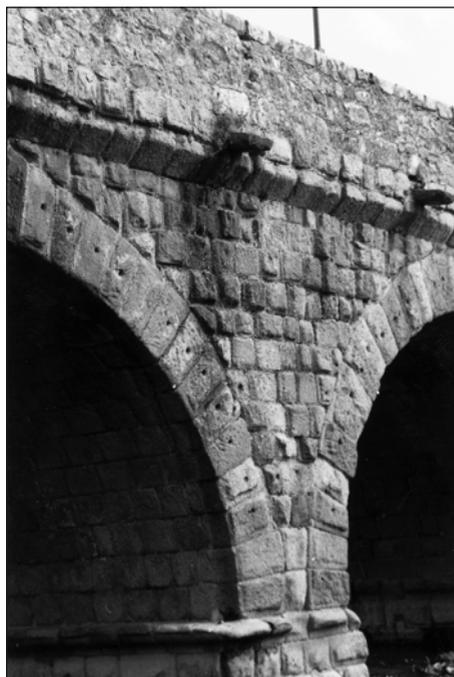


FIG. 5.–Hilada cortada por el medio bajo la cornisa superior en el puente Mayor de Salamanca.

8 “En general, los puentes romanos presentaban serias deficiencias de cimentación”. ARAMBU-RU-ZABALA, M. Ángel. *La arquitectura de puentes en Castilla y León. 1575-1650*. Valladolid: Junta Castilla-León. Consejería de Cultura y Turismo. 1992, pág. 49.

9 De O’CONNOR, Colin. *Roman Bridges*. Cambridge University Press, 1993, pág. 165: Puentes romanos españoles de gran longitud. El salmantino es el de mayor abertura relativa:

<i>Puente</i>	<i>Long. entre estribos</i>	<i>Suma de ojos</i>	<i>Razón</i>
Córdoba	274	169	0.62
Mérida	721	461	0.64
Alconétar	244	178	0.73
Salamanca	179	142	0.80

10 “...uso de espolones, innovación medieval que aparece en los siglos XI y XII”. Nota 8, pág. 51.

11 Un contrafuerte trabaja a compresión por lo que debería situarse aguas abajo, y además tiene que estar unido a la fábrica a la que ayuda, ya que su colaboración se basa en que no haya deslizamiento entre ambos. Esta unión se consigue con una traba que aquí no existe porque en la parte baja las dovelas de los arcos impiden la entrada de los sillares del contrafuerte en la pila y en la alta no hay coordinación entre las hiladas de ambos.

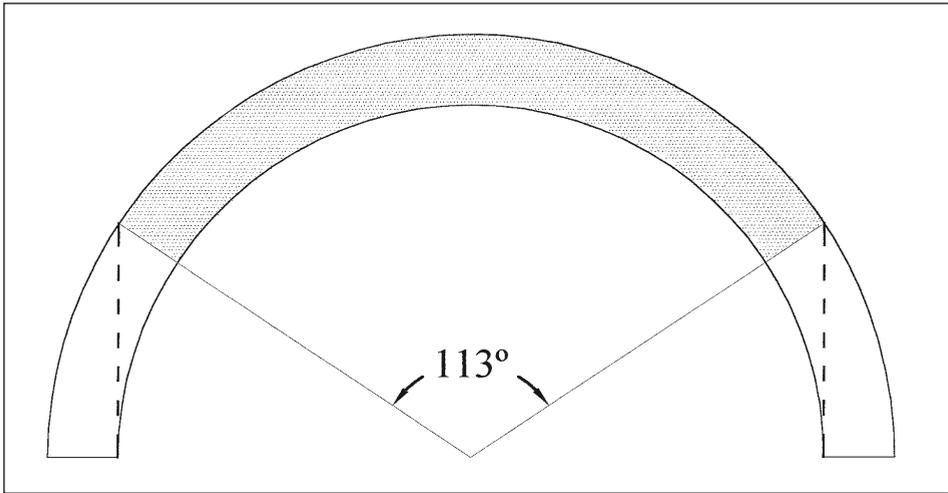


FIG. 6.—Sector del intradós del arco no integrado en las pilas. Puente Mayor de Salamanca.



En cuanto a los arcos, el espesor de los romanos se rige por dos leyes, una de proporción y otra de tamaño: usaban una proporción, también llamada esbeltez, de un décimo de la luz¹² y un tamaño máximo de 5' (unos 150 cm), limitado por la capacidad para alzar el peso de cada dovela.

La proporción del décimo da lugar a arcos muy estables debido a que se reduce mucho su desarrollo. En el puente romano de Salamanca, de los 180° del intradós sólo quedan fuera de los apoyos 113°, ya que las dovelas inferiores están físicamente dentro de las pilas. Esa parte ya no trabaja como arco o, si se prefiere, la línea de empuje puede salir de la geometría de las dovelas (Fig. 6).

FIG. 7.—Puente romano de Galapagar (postal P/032 de la Editorial Sogúino).

¹² La esbeltez es la relación entre grueso de las dovelas y luz del ojo, aunque es frecuente usar el valor inverso, o sea diez por décimo.

La limitación del tamaño de los sillares, no superiores a 1,50 m según la segunda ley, hace que los arcos de más de 15 metros¹³, que obviamente necesitarían dovelas de más de 1,50 m de grueso para cumplir con el décimo, tengan mayor esbeltez, aunque también se dan casos en los que forzaron la proporción aún con luces pequeñas, posiblemente por basarse en la experiencia de los artesanos del país. Por ejemplo, el puente de Galapagar (Fig. 7) alcanza una esbeltez de 40.

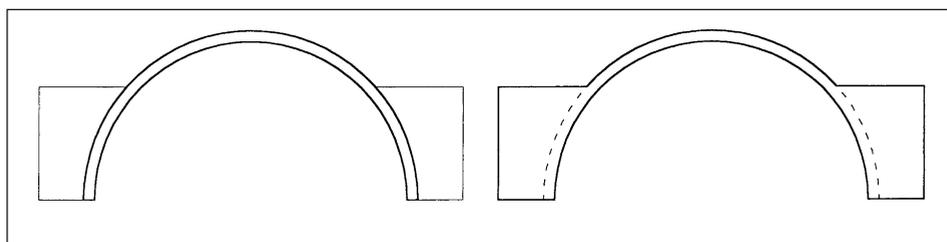


FIG. 8.—Arco mecánico y arco constructivo.

Para que un arco sea estable, el recorrido de la línea de empuje tiene que ocurrir con cierta holgura¹⁴ por el interior de la geometría del arco, o mejor, por el interior de todos los materiales resistentes, tengan o no forma de arco, siempre que no deslicen las piezas entre sí. El arco mecánico, la línea de empuje, puede salir sin riesgo del arco constructivo cuando llega a la zona de los riñones (Fig. 8), ya que se trata de la propia cepa del puente, construida con materiales aptos. Ello explica cómo puentes muy esbeltos son suficientemente seguros —de hecho ahí están— a pesar de que resultarían inestables si se calcularan sólo con la geometría de sus dovelas¹⁵. Las bóvedas de los puentes romanos mantienen frecuentemente el mismo espesor que los arcos de los frentes —llamados boquillas—, por lo que la seguridad es la misma en toda su anchura.

La dovela romana tiene generalmente una proporción 1:2 (ancho:canto) vista de frente, por lo que, añadiendo la condición de esbeltez 10, el número de ellas que se necesitan para formar un arco semicircular está geoméricamente determinado. Oscila entre 31 y 35 según se mida esa proporción en el centro o en el intradós¹⁶.

13 Alcántara, por ejemplo, con casi 30 m.

14 Que depende del tamaño y esbeltez del arco y de la resistencia y rigidez de los materiales.

15 La esbeltez límite para un arco semicircular sometido a su propio peso es algo superior a 17 por lo que una esbeltez de 35 o 40 asegura la ruina en cuanto se descimbre salvo que tenga material de relleno sobre los riñones.

16 No puedo dejar sin comentar las alteraciones que a veces añade la contemplación a la mera observación de las obras míticas como son, para nosotros, las romanas. Aunque sólo he contado las dovelas de algún que otro arco, y razonablemente habrá variaciones, a mí me salen 32. Sin embargo, la necesidad de simetría —que nunca le quitó el sueño a los constructores romanos—, la creencia de que la clave debe quedar centrada —cosa mecánicamente irrelevante en una bóveda como ésta— o el empeño en que todas las dovelas sean iguales —cuando sólo son parecidas—, lleva a decir, en todos los textos estudiados, que son 33. Supongo que para que la perfección no se vea afectada (y que sólo las contó, no bien del todo, el primero).

Si a eso le añadimos el picado realizado en el centro de cada piedra para elevarla y el tipo de labra¹⁷, obtenemos la fisonomía romana casi como si de un objeto industrial se tratara. Cabe incluso pensar que si el granito del puente de Salamanca se trae de lejos, de Ledesma, también se llevaría a otros puentes de, y por, la misma Vía de la Plata; a lo mejor incluso con las dovelas labradas ya en la cantera, como hiciera mucho más tarde Herrera en El Escorial para ahorrar transporte –y no iba a ser el primero–. La coincidencia entre las luces de algunos puentes de esa ruta me hace pensar en un trabajo relativamente seriado para cuya confirmación sólo es necesario realizar un análisis del origen de los granitos de los distintos puentes¹⁸. El conjunto de las leyes de proporción citadas hace que encontremos similitud con otros muchos puentes, como el de Segura (Cáceres-Portugal) o el de Chaves (Portugal); incluso, los arcos del de Mérida, si los extraemos del contexto de su puente, que sí es distinto al de Salamanca, son iguales.

Centrándonos en el puente de Salamanca, su resistencia a las riadas ha resultado suficiente gracias no tanto al diseño general, cuyos defectos termodinámicos se han mencionado, sino a que el material granítico es de primera calidad, la esbeltez es muy segura, el tamaño de las dovelas es grande (lo que las hace más estables) y las juntas son finas y bien labradas. Todo ello coincide, en líneas generales, con cualquier obra romana, al menos, con las que nos han llegado.

2. EL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PUENTE DEL XVII

Bajo la denominación de puente del XVII me referiré a la parte que ocupa la otra mitad del puente Mayor (Fig. 9). En ese siglo se realizan obras generalizadas que vinieron forzadas por los estragos producidos por la gran riada de enero de 1626, conocida como de San Policarpo, y que le dan cierta identidad a un conjunto de tramos que se debieron ir haciendo poco a poco a causa del posible progresivo aumento de la anchura del cauce provocado por las avenidas medievales¹⁹. No hay otra forma de entender que haya arcos constructivamente tan distintos en

17 “Opere cuadrato rustico”. Nota 4, pág. 46.

18 Puente de Cáparra (camino secundario a la Vía de la Plata) sobre el Ambroz, 4 arcos, de 9,20 y de 8,60; la pila 3,60 m; sin tajar aguas abajo. Puente de la Doncella, sobre el Ambroz, destruido en 1957 por estorbar a la N-630: puente de dovelas lisas e irregulares con un arco de 9,30. Puente de Salamanca: luces 9,50 m. Pilas de 3,35. De BUENO HERNÁNDEZ, Francisco. Los caminos históricos de la provincia de Salamanca hasta el siglo XV. En *Revista OP*, nº 25, 1993. Madrid: Colegio de Caminos, Canales y Puertos, págs. 73-75.

19 “El de Mérida consta de tres puentes. La presencia del primero causó la desviación del río hacia el norte; esta segunda madre fue cruzada con un segundo puente, por lo que el río se desvió hacia el sur; y de nuevo se construyó ahí un tercero”. Nota 9, pág. 165. También, y más famoso, es el de Hospital de Órbigo, por ejemplo en nota 8, pág. 140. Presumiblemente, debió ocurrir lo mismo en Salamanca, donde el puente romano ... formado por 15 arcos, fue incrementado hasta ... un total de 26 arcos en el siglo XVII”. Nota 9, pág. 165.

esa zona. Este paulatino ensanchamiento no se podía resolver con rellenos, descenderos o taludes, ya que los ojos del tramo romano no tienen capacidad de evacuación suficiente para las crecidas del Tormes²⁰.

2.1. ACERCA DEL ORIGEN Y CAÍDA

Escritos cien años anteriores a esa riada indican que el lado del Arrabal no era romano²¹. Las distintas partes que componen este tramo nuevo poco tienen que ver entre sí. Unas tienen tajamares y otras no, éstos son distintos en según qué pilas, los arcos de las boquillas pueden ser de granito o de piedra caleña y, estas areniscas, son de distinta calidad y procedencia²².

Este conjunto medieval fue soportando seguramente mal²³ las riadas²⁴; hasta que llegó la de San Policarpo que se lleva 10 arcos modernos y fuerza una obra de gran

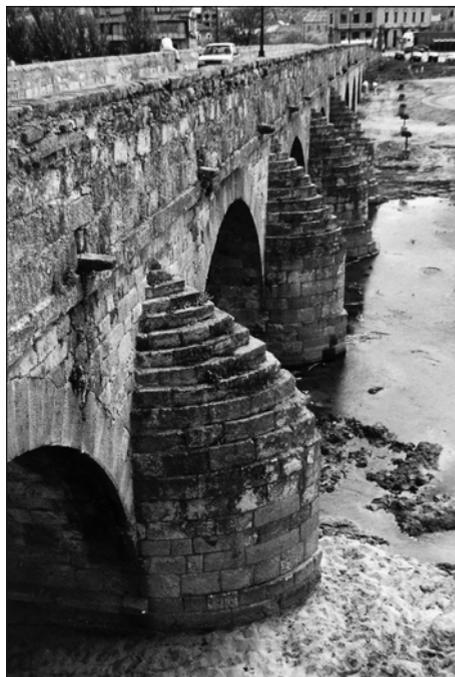


FIG. 9.—Aspecto del tramo del puente Mayor de Salamanca construido en el siglo XVII.

20 El puente romano tiene capacidad de desagüe para un 50% de una avenida máxima como la medida en 1940-1941 por lo que el aumento de longitud del puente requiere seguir haciendo puente como lo realizado. DURÁN FUENTES, Manuel. Puentes romanos peninsulares: tipología y construcción. En *Actas I Congreso Nacional Historia de la Construcción*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, E. T. S. de Arquitectura de Madrid, CEHOPU, CEDEX, Ministerio de Obras Públicas, 1996, pág. 172.

21 “En el primer tercio de XVI ... Juan Ramón de Transmiera ... *Lo otro medio es hispano...*”, VILLAR Y MACÍAS, Manuel. *Historia de Salamanca*, 1ª edición, Salamanca, 1887, reimpresión, Salamanca: Grafica, 1973, libro I, pág. 32.

22 “... Siguen después 12 arcos con tajamares redondos, algunos apuntados, de granito y piedra caleña. Su apariencia no es muy vetusta”. Nota 4, pág. 46.

23 “los puentes románicos eran más frágiles [que los romanos], y lo seguirán siendo hasta que la investigación tecnológica supla los defectos romanos”. Nota 8, pág. 14.

24 Resumen de riadas: 1229, daños a los dominicos instalados en la iglesia de s. Juan el Blanco; 3-nov.-1256, los mismos dominicos y las monjas benitas de Sta Mª de la Serna tienen que desalojar el convento por derrumbamiento; 1275, se reparan los daños de 1256; 1422, destrozo importante en el convento de la Serna por otra avenida; 1479, una riada destroza el templo de los Carmelitas Calzados; 1482, una riada perjudicó la parte del puente que se hallaba resentida; 1490, avenida citada por Araujo; 1499, causó muchos daños destruyendo dos arcos del puente; 1543, datos de obras; 1555, estragos, pero no dice nada de daños en el puente; 1582, el río se lleva los edificios de las riberas; 1594, los trinitarios abandonan s. Juan el Blanco, aburridos. Ver GONZÁLEZ IGLESIAS, Lorenzo. *El Río, el Toro y la*

costo²⁵ que se retrasa cincuenta años y que debió aprovechar mucho de las obras medievales²⁶. Tuvo, entretanto, pasos de madera²⁷ hasta que se realiza la reconstrucción, hacia 1677, y que parece que lo deja, estructuralmente hablando, como hoy lo vemos, aunque haya obras posteriores de importancia.

Acerca del reaprovechamiento de las partes de un puente arruinado parece necesario aclarar que una crecida no se lleva un puente de piedra. Los elementos pequeños pueden ser arrastrados por la corriente pero un sillar difícilmente recorrerá unos metros. Eso si los sillares estuvieran sueltos, que no es el caso, ya que forman parte de una fábrica cuyos morteros los unen. De modo que un puente se viene a quedar donde está, aunque inservible y seriamente quebrado por causa de las socavaciones producidas por la fuerza del agua, que arrastra a las arenas y gravas de los lechos y que por ser materiales de poco tamaño, como decía al principio, se los lleva el río. Efectivamente, el puente se arruina y caerá aguas abajo, pero en la acepción vertical de la palabra. Más que las aguas turbulentas del Tormes, debieron de arrastrar los carros de bueyes que, subiendo la cuesta, irían depositando los sillares en el remanso de los edificios de la ciudad. Los restos que se salvaron de los daños y formaron parte de aquella reconstrucción son la referencia que, de los distintos puentes medievales, queda. Confiemos en que, si hay intervenciones que puedan afectar a su fisonomía, respeten la disparidad que en su diseño, materiales y juntas han ido dejando esas diversas etapas constructivas.

2.2. DISEÑO Y MANTENIMIENTO

Una vez más, el paso de los años sobre una obra vetusta, va dejando su huella. En este caso, las marcas más interesantes son las que nos muestran, a través de sus formas variadas, el desarrollo de los conocimientos y la influencia de los costes de construcción, tanto de las épocas medievales como del momento de la reconstrucción. El resultado es un puente con elevadas mejoras hidrodinámicas, por un lado, y una calidad constructiva muy inferior a la romana, por otro. Naturalmente, los conocimientos técnicos del xvii son superiores a los de los constructores clásicos, pero la economía que rige las obras de la reconstrucción también tiene que ver en el resultado²⁸. Las dovelas de las bóvedas tienen un espesor mucho

Puente. En *El Museo. Crónica Salmantina I*. Salamanca, 1957 pág. 39-50, y HERRÁEZ HERNÁNDEZ, José María. El puente romano de Salamanca y la riada de 1499 según el manuscrito de José Iglesias de la Casa. En *Actas del I Congreso de Historia de Salamanca*. Salamanca, 1992, tomo II, pág. 355-362.

²⁵ Presupuesto de los canteros: 682.900 reales para reedificar los 10 arcos derribados, nota 21, pág. 33.

²⁶ Este arruinamiento, como tantos otros a lo largo de la historia y el presente, afectó a los criterios de diseño de estructuras y, en este caso, debió tener influencia en Fray Lorenzo de San Nicolás —que vino a vivir a Salamanca en el tiempo en que el puente estuvo roto—, a juzgar por las instrucciones de obra masiva que escribió para el dimensionado de los puentes.

²⁷ Después de San Policarpo se harían reparaciones provisionales con entramados de madera en 1628. GONZÁLEZ IGLESIAS. Nota 24, pág. 45.

²⁸ “Desde fines del siglo xvi la cantería se encarece notablemente ... añádase que los materiales doblaron su precio entre 1592-1605 ... de manera que hubo que encontrar fórmulas para abaratar la

menor que las de los arcos de las boquillas, cosa que no ocurría en el puente viejo. El tipo de piedra dista de ser de la dureza y resistencia del granito²⁹. Las boquillas de arenisca están redondeadas (Fig. 10) mientras que las realizadas con granito (romanas y nuevas) tienen aristas bien marcadas. Quizá es sólo la meteorización pero podría haberse empleado conscientemente un material blando con las aristas redondeadas para producir menores problemas hidrodinámicos y de desgaste del material.



FIG. 10.—Boquillas de arenisca redondeadas en la parte moderna del puente Mayor de Salamanca.

Como es lógico, en los tres siglos largos que han transcurrido desde entonces hasta hoy, nuevas crecidas y nuevos daños³⁰ obligaron a nuevas intervencio-

construcción, generalmente en detrimento de la calidad de las obras. Después, la bajada del valor de la moneda en 1642, repercutió directamente en la marcha de las obras...". Nota 8, pág. 44.

29 "En la reconstrucción de 1677... era preciso usar otro tipo de piedra más cercana, barata, trabajable y resistente a la inmersión prolongada". JIMÉNEZ FUENTES, Emiliano y MARTÍN DE JESÚS, Santiago. Sobre el material empleado en la reconstrucción del puente romano de Salamanca, durante el siglo XVII. En *Actas del I Congreso de Historia de Salamanca*. Salamanca, 1992, tomo II, pág. 364.

30 Crecidas: 6-nov.-1708, un huracán dañó gravemente los cimientos de la torre desencajando muchas piedras; 1718; 4.dic.1739, se previó y para evitar desgracias se cargó el puente con hierros y piedras; las crecidas de 1739 y 1740 se llevaron el estribo y socavaron algunas piedras de las cepas;

nes³¹. Desde 1681 las citas son más frecuentes que antes. Debe tener que ver con ello la mayor atención borbónica a las comunicaciones de la que mostraron los últimos Austrias, la novedad del informe técnico que forzó intervenciones al avisar de los riesgos (aunque no siempre ajustados a la realidad) y la mayor cercanía temporal³².

Hasta aquí, se ha dado un vistazo al pasado que añade a su propio interés el de que nos permite conocer los problemas históricos de este puente y nos orienta acerca de las líneas de vigilancia para el futuro. Como se desprende de la referencia de daños y reparos, la mayor frecuencia de los problemas se encuentra lógicamente en las zonas sumergidas.

3. ESTABILIDAD GEOMÉTRICA DEL PUENTE

En este apartado analizo las cualidades mecánicas asociadas a la geometría entrando mínimamente en cuestiones de resistencia pero no de deterioro, que queda para los capítulos siguientes.

Para valorar la seguridad del monumento es útil la representación gráfica de los cálculos que consiste en trazar una línea que vaya uniendo el punto de paso de las compresiones por cada sección del arco. Se llama línea de empuje y su trazado es el que figura en los distintos esquemas que incluye este trabajo. No hay una sino muchas líneas posibles. Cada una, representa una posibilidad de equilibrio

1769; 1772; 1778; 1788, una avenida que produjo daños no reparados hasta 1803. Toda la primera mitad del XIX sufrió daños no reparados sino con maderas; 18-feb.-1855, la más notable de nuestros días; 1909, debió de tener menos importancia. De nota 24 y RUPÉREZ ALMAJANO, María Nieves. *Urbanismo de Salamanca en el siglo XVIII*. Salamanca: Colegio Oficial de Arquitectos de León. Delegación de Salamanca, 1992, pág. 46 y *passim*. Es curioso, porque ese año (1909) el Duero tuvo una crecida considerada de las mayores en la historia de Europa occidental. MENDILUCE José M^a y HERAS, Rafael. Criterios y experiencias de la regulación de los ríos. Estudio de máximas crecidas. En *Grandes presas. Experiencias españolas en su proyecto y construcción*. Comité Nacional Español de grandes presas. MOPU, 1976, pág. 55.

31 Reconstrucciones: 1709-1710, 1762-1768 y 1802. No modifican sustancialmente su fisonomía. RUPÉREZ ALMAJANO, M^a Nieves. Nota 30, pág. 48.

32 Resumen de reparaciones: En 1717 algunas cepas; en 1726, una cepa; 1728, se socialza el estribo de Salamanca; 1768, enlosado de medio puente y estribo (parte romana), se repararon 15 ojos pero no se varió su estructura; 1780, se empieza a resentir la torrecilla, se había podrido la madera de chapitel y bóveda por defecto de construcción y se reconstruyó sin alterar la forma; 1791, los 14 machones romanos estaban descarnados, especialmente algunas hiladas de los tajamares; 1802, informes de daños: las 5 cepas inmediatas al estribo estaban socavadas, descarnadas, faltas de piedras y casi en el aire. Los riesgos anunciados son tan grandes que se aprovecha lo que queda del verano para reparar y el 13.nov.1802 se informa de la terminación gastando la décima parte de lo informado. La Academia de San Fernando duda del asunto y pretende enviar un académico. (ZAONERO, J., *Libro de noticias de Salamanca*. "Por julio se principió la obra del puente que fue ociosa pues no se necesitaba, y lo que se pensó que avía de durar tres meses, se acabó en uno, porque los machones que suponían mui estropeados del agua y del tiempo, no tenían que reparar y, en fin, todo fue por creerse de informes falsos". Nota 31, pág. 48.

y, lógicamente, un arco bien dimensionado y conservado tiene muchas posibilidades de encontrarlo (lo contrario sería estar al borde del colapso). Hecho esto, la seguridad geométrica se define como la relación entre el espesor real del arco y el de la corona en la que se inscribe la línea de empuje que quede más centrada de todas.

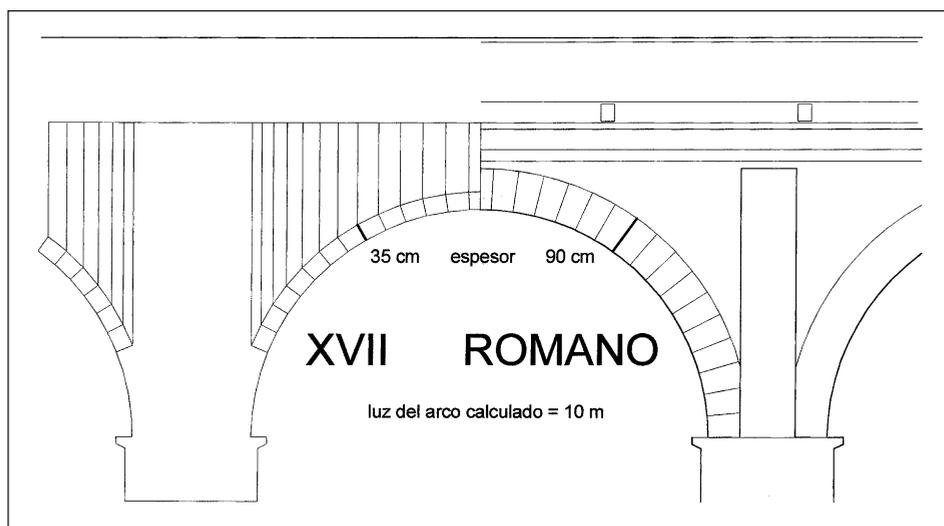


FIG. 11.—Espesor de las dovelas en los arcos romanos y del siglo XVII del puente Mayor de Salamanca.

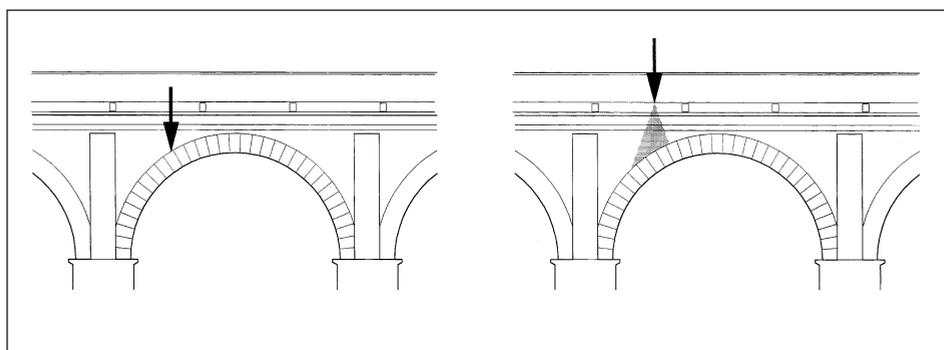


FIG. 12.—Los rellenos entre la calzada y el trasdós de los arcos carecen de capacidad estructural y no amortiguan la carga de la calzada.

Los cálculos los he realizado para un arco de 10 m de luz, si bien en la realidad oscilan entre 9,30 y 10,00 m. Para el espesor de las dovelas he usado dos valores: 35 cm de la bóveda del XVII y 90 cm en la romana (Fig. 11)³³. Se ha considerado que los rellenos carecen de capacidad estructural (Fig. 12), que no amortiguan la carga concentrada de la calzada³⁴ y que su peso gravita verticalmente sobre las dovelas³⁵. Con estas simplificaciones, todas conservadoras, veremos que se alcanzan resultados de seguridad holgados, lo que ahorra cálculos mayores.

–*Seguridad de la rosca aislada del arco*: si en lugar del puente completo sólo estuviera en pie la rosca de los arcos, la bóveda del XVII dispone de una seguridad geométrica del orden de 1,90. Esto quiere decir que se puede inscribir una línea de empuje en una corona cuyo espesor ronda la mitad del grueso del arco de piedra. Si eso ocurre en la bóveda de 35 cm, en la de 90 de la parte romana la seguridad geométrica sube a 7,50³⁶. Por tanto, la obra romana desde este punto de vista –desde los demás es aún más favorable– es cuatro veces más robusta (Fig. 13).

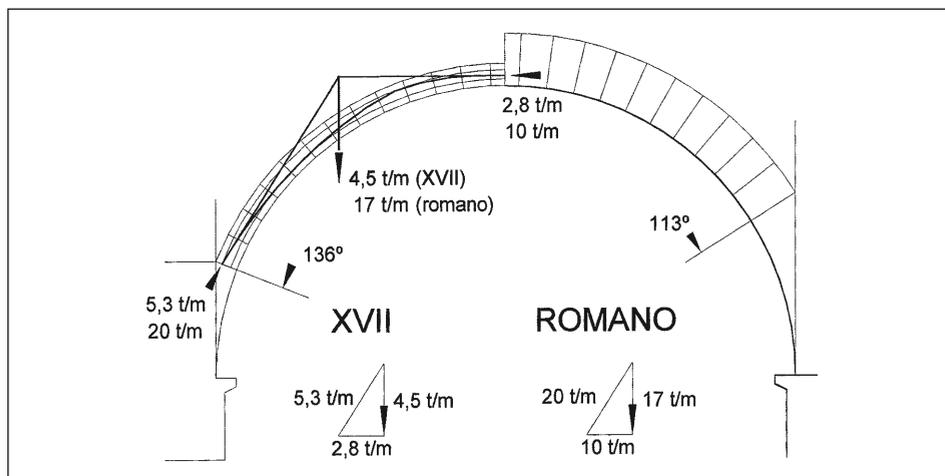


FIG. 13.–*Seguridad de la rosca de los arcos en el puente Mayor de Salamanca.*

33 Los testigos, extraídos recientemente indican que las dovelas de la obra romana mantienen el espesor visible en las boquillas a lo largo de toda la bóveda mientras que en los arcos nuevos sólo la boquilla tiene esa dimensión ya que en el interior el grueso de los sillares ronda los 30-40 cm.

34 Creo que es más apropiado el empleo del término calzada para estos puentes masivos que el de tablero, que dejaría para aquellos otros en los que el piso está separado de la estructura general.

35 Para incluir este asunto en el cálculo hay que determinar el ángulo de rozamiento entre rellenos y entre ellos y el arco. Es difícil obtenerlo, por lo que normalmente se trabaja sin considerar esto o empleando valores genéricos. Que el cálculo simplificado es conservador lo estudió Rankine y, cien años después, Harvey (pág. 78-80 y fig 4.14 en HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago. *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España. ca. 1500- ca. 1800*. Tesis doctoral. E. T. S. de Arquitectura. U. P. de Madrid, 1990).

36 Para arcos semicirculares véase directamente HEYMAN, Jacques. Capítulo 18: Estimación de la resistencia de los arcos de fábrica y Capítulo 6: La seguridad de los arcos de fábrica. En *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera y E.T.S. de Arquitectura de Madrid, 1995.

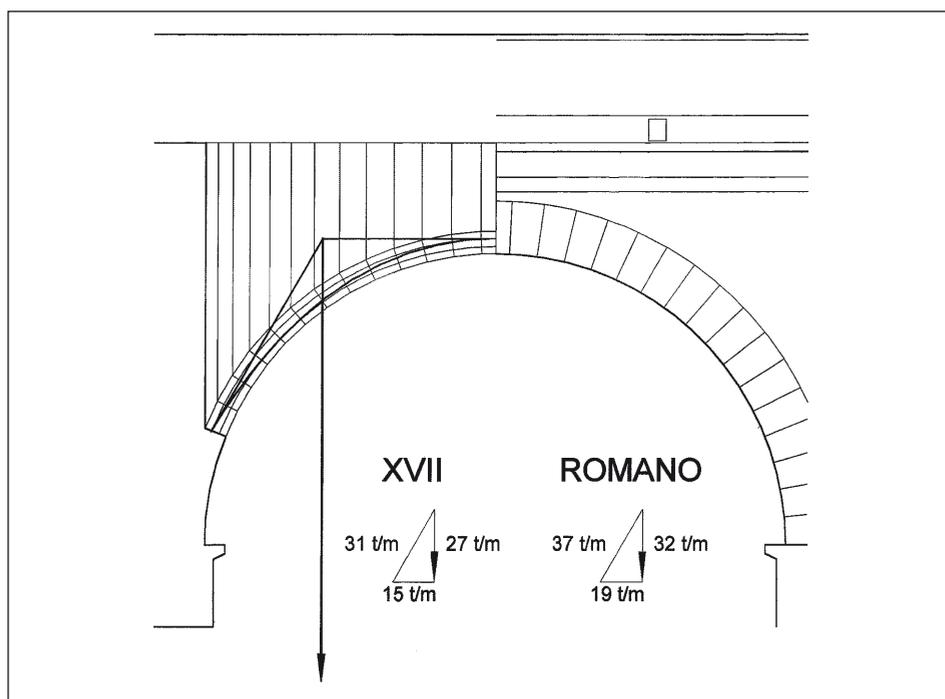


FIG. 14.—Seguridad del puente Mayor de Salamanca sin considerar sobrecargas.

Con respecto a las tensiones máximas a la que está trabajando el arco, entendiendo la fábrica como un material continuo y uniforme, en la parte nueva (arenisca) alcanza los $3,0 \text{ kp/cm}^2$ y $2,7 \text{ kp/cm}^2$ en el granito de la parte romana³⁷.

—Seguridad del puente completo sin sobrecargas: la seguridad geométrica del puente (arco y relleno hasta la calzada) mejora respecto del arco aislado como siempre ocurre en los sistemas abovedados³⁸. En el puente del XVII, sube de 1,90 a 2,50 y, en el romano, de 7,50 a 8,00 (Fig. 14). Por otra parte, las tensiones máximas son ahora de 17 kp/cm^2 en la parte nueva y de $4,5 \text{ kp/cm}^2$ en la vieja.

37 Puede resultar extraño que un arco más grueso, y por tanto más pesado, tenga tensiones menores. Esto se explica porque la tensión aumenta con la excentricidad relativa de la línea de empuje respecto del canto del arco y en la zona romana es menor que en la del XVII.

38 Aquí la mejora no es tan apreciable como en las bóvedas de los techos de los edificios que, al tener una altura de relleno más ajustada a las necesidades mecánicas (por no tener que quedar niveladas como le ocurre a la calzada de un puente), mejoran tanto la estabilidad que es arriesgado vaciarlas. El conocimiento que tenían los constructores de la importancia del relleno, y que sólo desde hace doscientos años se puede determinar mediante el cálculo, lo demuestra su permanente empleo; conocimiento que aprendieron de la mera observación de edificios y ruinas.

—*Seguridad ante sobrecargas*: las sobrecargas repartidas de modo más o menos uniforme no variarían significativamente lo anterior aunque se tratase de valores descomunales, de modo que el posible riesgo hay que buscarlo en la aplicación de fuertes sobrecargas concentradas que representen el efecto de las ruedas de un camión.

Si se realiza un cálculo sencillo con la única misión de ver el orden de magnitud de las sobrecargas que aceptaría el puente, vale con analizar el efecto de una carga que ocupe la anchura de la calzada (simulando al eje de un camión), aplicada en cualquier sección. Aunque no hay que hacerlo una a una en todas, puesto que se sabe que la que admite menor carga es la situada en el cuarto de la luz del arco³⁹.

Al valor de la carga concentrada que se obtenga de lo anterior habrá que aplicarle un coeficiente de seguridad. He aplicado la obtenida en los cálculos anteriores para el arco aislado, obteniendo los siguientes resultados: el puente del XVII (que tenía una seguridad 1,9) admitiría una carga concentrada de 10,7 toneladas por metro de ancho y, como la calzada tiene seis, resulta 64 toneladas; el romano (seguridad 7,5) admite 77 toneladas por sección. Ambas, enormemente superiores al tránsito actual.



4. DEFORMACIONES VERTICALES DEL CONJUNTO DEL PUENTE

La deformación vertical de los arcos del puente se hace patente si nos fijamos en la leve ondulación de la imposta que corre sobre los arcos (Fig. 15). Con más información se conocerían los descensos de cada clave respecto de sus apoyos, los asientos de cada pila y sus desplomes transversales con los que medir alabeos de las bóvedas, lo que permitiría

FIG. 15.—*Ondulación de la imposta que corre sobre los arcos del tramo moderno del puente Mayor de Salamanca.*

39 Tanto esta justificación como el proceso seguido para esta evaluación está desarrollado en HEYMAN, Jacques. Capítulo 18: Estimación de la resistencia de los arcos de fábrica. En *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera y E.T.S. de Arquitectura de Madrid, 1995, figura, pág. 260.

una valoración más amplia si fuera necesario⁴⁰. Con los datos disponibles se analizan aquí las consecuencias a que pudiera dar lugar el primer movimiento de descenso comentado.

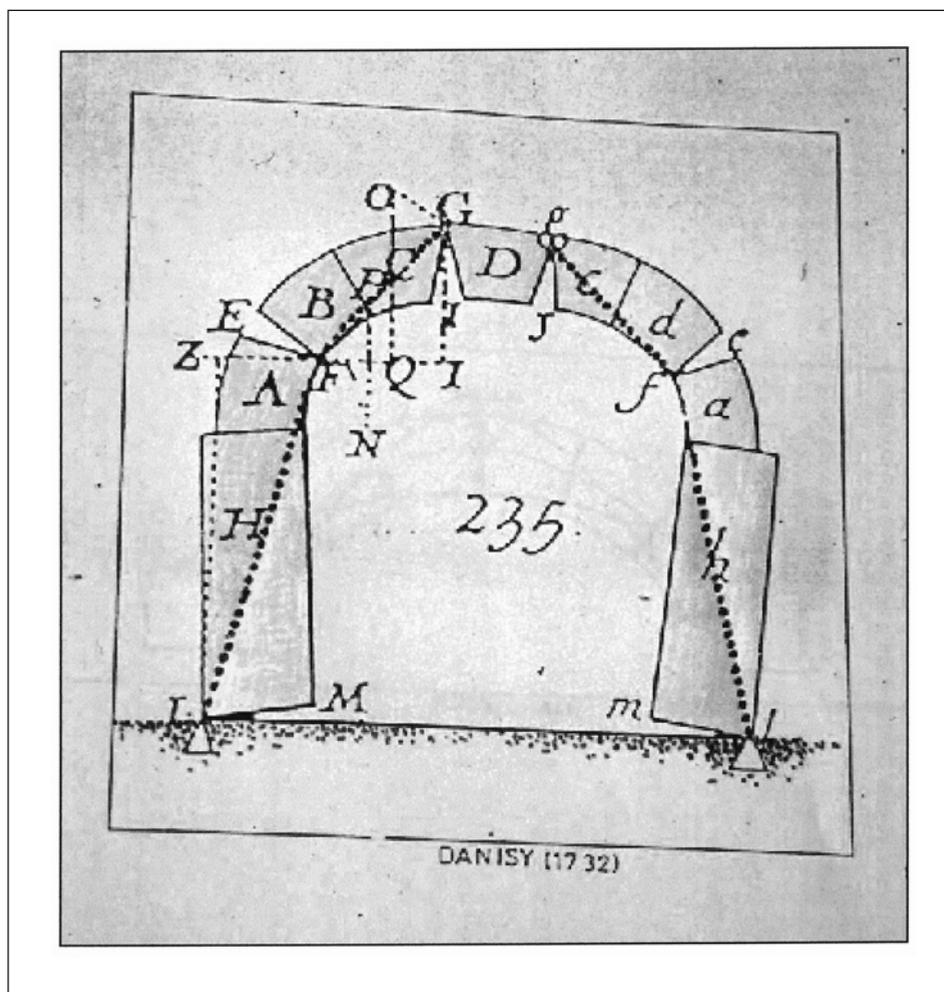


FIG. 16.—Deformada característica en arcos de medio punto.

⁴⁰ Hay un levantamiento fotogramétrico efectuado por Leandro Cámara y Pablo Latorre con fecha posterior a mi informe.

Este descenso está relacionado con el hecho de que el arco está comprimido, lo que supone un acortamiento de su directriz y, por otro lado, con la excentricidad con que la línea de empuje va pasando a lo largo de él, lo que altera su forma circular. Por ambos motivos, un arco de medio punto tiene una deformada característica⁴¹ que aumenta a medida que lo hace el deterioro del material (Fig. 16), de modo que la seguridad disminuye con el paso del tiempo. Esta pérdida es la que se mide ahora.

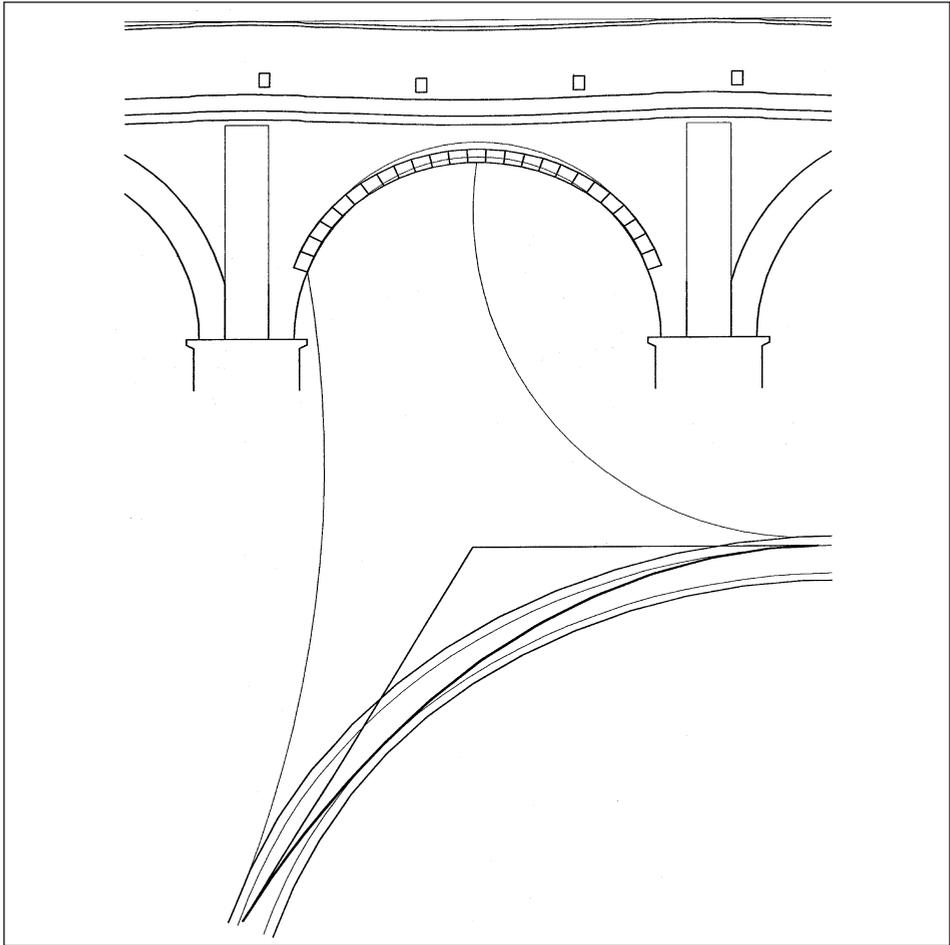


FIG. 17.—Estados límite de deformación en los arcos del puente Mayor de Salamanca.

41 Un arco de un puente o una arcada, tienen una deformación menor que un arco aislado ya que al estar aproximadamente equilibrados los empujes no hay desplome, como ocurre en los que apoyan en muros o contrafuertes. La deformabilidad queda limitada al acortamiento producido por el deterioro de los materiales. Nota 35, pág. 59 y fig 4.2.

Las deformaciones de un arco de fábrica con una esbeltez y tamaño adecuados y con un estado de conservación aceptable son muy leves debido a la baja tensión a que está trabajando. En los de ladrillo, las deformaciones son mayores que en los de piedra, por la menor rigidez del material; en los de dovelas pequeñas, más que en los de dovelas grandes, por el mayor número de juntas; en los de juntas gruesas, más que en los que las tienen finas, por la mayor cantidad de mortero y, en los de juntas mal hechas, más que en los bien contruidos, porque fuerzan a una irregularidad de la deformación que descentra los esfuerzos y, en consecuencia, aumenta tensiones y giros locales.

El puente Mayor está construido con grandes dovelas de piedra⁴² y casi todas sus juntas son finas y regulares. La gran rigidez del material pétreo permite considerar a los sillares indeformables, por lo que el descenso global del arco se debe al aplastamiento que pueda producirse en las juntas, cuyos morteros sufrirán mermas debido a causas químicas, heladicidad, meteorización, etc.⁴³.

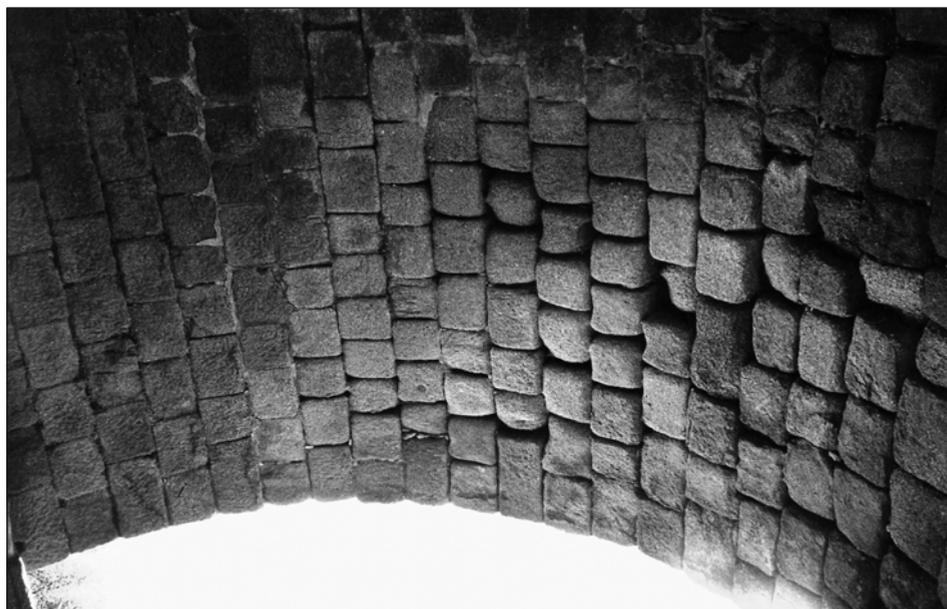


FIG. 18.—*Sillares redondeados en uno de los arcos romanos del puente Mayor de Salamanca.*

42 “En la reconstrucción de 1677 se utilizó un tipo ... de areniscas pre-eocénicas distinta de las eocénicas de Villamayor... Era preciso usar una piedra más cercana, barata, trabajable, y resistente a la inmersión prolongada. La ciudad se asienta sobre ellas... Se las llama Areniscas Celestinas... La obra romana es de grandes piezas granitoides... El granito parece haberse traído de importantes distancias, área de Ledesma”. Nota 29, pág. 364.

43 En la zona romana del puente las dovelas tienen una anchura media aproximada de 45 cm y si se considera que las juntas de mortero tienen 2 cm de espesor, la parte de arco indeformable (la piedra) ocupa el 96% de la longitud.

Dando por hecho que la carga del puente es hoy prácticamente fija –su propio peso– al no haber tránsito pesado, sólo el aumento de la degradación de los materiales produce un aumento de deformación y reduce la seguridad. Se ha realizado el cálculo para un estado límite de deformación (Fig. 17) suponiendo que el espesor de las juntas se anulara como consecuencia de una hipotética desintegración total del mortero. El arco perdería levemente su forma circular y la línea de empuje ocuparía más espesor que antes. El resultado obtenido es que la seguridad baja de 1,90 a 1,63 en la bóveda del xvii (espesor 35 cm) y no se altera de modo apreciable en la romana, ya que su deformación es imperceptible.

Hay zonas en las que muchos sillares consecutivos están redondeados (Fig. 18), y puede ser conveniente realizar un tratamiento que restituya su forma para asegurar su estabilidad. Obsérvese, que si se tratara de un arco aislado en lugar de una bóveda de cañón, su equilibrio sería imposible ya que las dovelas podrían girar libremente y estaríamos ante un arco poliarticulado, o sea, inestable; pero, al ser una bóveda, un posible movimiento local incontrolado tiene muchas posibilidades de quedar limitado gracias al resto de ella y a los rellenos interiores.

5. MORTEROS Y RELLENOS

En un edificio el mortero permanece dentro de la fábrica cumpliendo su misión de reparto pero en un puente esta circunstancia es problemática. El permanente



FIG. 19.–Efecto del lavado del terreno en una esquina de una pila del puente Mayor de Salamanca.

contacto con el agua en las zonas sumergidas y el frecuente ambiente húmedo del resto, aparte de las heladas, obliga a usar morteros especialmente resistentes y a mantenerlos en buen estado de conservación. En las zonas sumergidas, la gran cantidad de socavaciones habidas tiene también que ver con el desgaste de los morteros, porque el efecto abrasivo de la corriente les va haciendo desaparecer y acaba descolgando los sillares (Fig. 19).

Los rellenos del puente son térreos por lo que también se ven afectados si entra el agua en ellos. Este relleno ocupa todo el interior, desde la calzada hasta



FIG. 20.—Utilización reciente de pequeños cantos de pizarra en las juntas rebundidas por erosión de la sillería romana del puente Mayor de Salamanca



FIG. 21.—Tubería instalada en época reciente en el relleno del puente Mayor de Salamanca.

el extradós de los arcos, pavimentos antiguos aparte. Excavaciones arqueológicas de hace unos años⁴⁴ coinciden con la descripción de los planos de obras públicas (ver nota 8) y con las excavaciones de 1999⁴⁵.

En la parte romana del puente y, aunque en menos proporción, en la nueva, el mortero de las juntas está cuidadosamente protegido con pequeños cantos de pizarra⁴⁶. Puede observarse que esta protección aparece también entre sillares muy erosionados y, por tanto, en juntas rehundidas respecto de su estado original (Fig. 20), lo que aleja la posibilidad de que sea romana. Por otra parte, esta protección no sólo afecta a las juntas sino a las grietas, lo que indica la avanzada edad de esos daños o lo relativamente reciente del rejuntado.

El agua entra por las juntas de la sillería y por el empedrado de la calzada⁴⁷. Su acceso se ve favorecido por dos circunstancias: los matojos que nacen en la fábrica y enraízan en el relleno, que remueven los sillares y producen grietas, y los aliviaderos taponados de los bordes que impiden la evacuación del agua de la calzada.

El puente se ha usado para enterrar varias canalizaciones en los rellenos⁴⁸, alguna de las cuales lo ha tenido en una situación de riesgo inadmisibles (Fig. 21). La suerte ha permitido que no se haya producido una fuga de la importancia de su calibre. Hay grandes humedades en varias bóvedas que parecen excesivas para provenir de un aliviadero superior atascado y que pueden deberse a alguna rotura.

Toda el agua que entra en los rellenos buscará salida por el único sitio posible que, por gravedad, son las juntas de las bóvedas inferiores cuyos morteros van siendo minados. También empapa a las dovelas que, con la ayuda de las heladas, se van redondeando. El daño es más pronunciado en materiales porosos (ver Fig. 18), donde la presencia de un gran grupo de sillares de grano grueso agrava la situación.

44 De nota 2, pág. 3:

- I 15 cm Pavimento de enrollado, lecho de cemento y otra capa de guijarros.
- II 14cm Adoquines de granito de hace pocos años.
- III 8-12 cm Lecho de mortero de cemento para asiento de los adoquines. En la zona del XVII se dispone bajo esta capa III de un relleno de tierra continuo hasta los arcos.
- IV 6-11 cm Tierra arcillosa rojiza con guijarros.
- V 3-11 cm Capa de cal asociada a veces a un antiguo pavimento de pizarra y otras no existe.
- VI 20 cm Relleno de tierra con mucho guijarro.
- VII Pavimento de sillares de arenisca en la zona romana. Parece que desde este pavimento hasta las roscas de los arcos es de tierra.

45 Para estudios futuros parece que este asunto está suficientemente contrastado.

46 "Entre bloques [de granito romano], fragmentos de pizarra silíceo negra... Para las rocas intersticiales se empleó material inmediato de los Pizarrales y areniscas de la misma Salamanca". Nota 29, pág. 364.

47 "...en 1719, ... había que rehacer el enlosado para evitar ... que el agua humedeciese los arcos, destruyendo la fábrica...". Nota 31, pág. 49.

48 El Ayuntamiento decide colocar una tubería para abastecimiento de agua. Hay dos conducciones de agua previas a la de 1986. Una tubería de hierro de época indeterminada de 15 cm de diámetro que corre paralela al pretil occidental. Otra que va pegada al pretil oriental y que ha quedado vista al abrir estas zanjas es de fábrica de ladrillo macizo sentado con cemento, rectangular y con cubierta de pizarra. Nota 2, págs. 1 y 3.

6. LA ROTURA AISLADA DE SILLARES

Se observa cierto número de sillares fisurados, más en la zona romana que en la nueva. Son daños antiguos como demuestra el que las grietas estén rellenas de piedras de pizarra y que los labios de las fisuras se vean redondeados por la erosión (Fig. 22). El asunto está relacionado con la pérdida de morteros de las juntas que impide tanto la suave distribución de los esfuerzos como los leves y necesarios movimientos entre sillares para hacer frente a los cambios higrométricos. El mortero tiene como misión servir de almohadilla de reparto de esfuerzos y microfisurarse él, en lugar de los sillares, cuando se producen mínimos movimientos diferenciales que superen su capacidad elástica. Su pérdida hace que las piezas se toquen directamente a través de unos pocos puntos –los granos que más resalten– lo que da lugar a tensiones locales muy elevadas⁴⁹.

La consecuencia de esta concentración de tensiones no es tanto el aumento de las compresiones, que difícilmente llegan a alcanzar valores críticos para la resistencia de la piedra sana, sino que induce la aparición de tracciones transversales horizontales que son las que realmente consiguen romper al sillar. Estas tracciones nacen fundamentalmente de tres causas:



Fig. 22.–Ejemplo de grietas antiguas en sillares del puente Mayor de Salamanca.

- Un sillar mal apoyado en dos inferiores se comporta como si fuera una viga (Fig. 23 A y B). Se producen tracciones horizontales en su parte inferior que, para las proporciones de las piezas de este puente, son del mismo orden de magnitud que la compresión que baje por él.

⁴⁹ A pesar de ello, aún seguimos repitiendo que los romanos hacían sus obras a hueso. Veamos el resumen de los ensayos de Tourtay 1885, en nota 35, pág. 33:

- a) Las fábricas de piedra sin juntas dan resistencias bastante inferiores a las rejuntadas.
- b) Las fábricas con una simple lechada parecen monolíticas y dan resistencias similares a las de la piedra y muy superiores a las que tienen juntas.

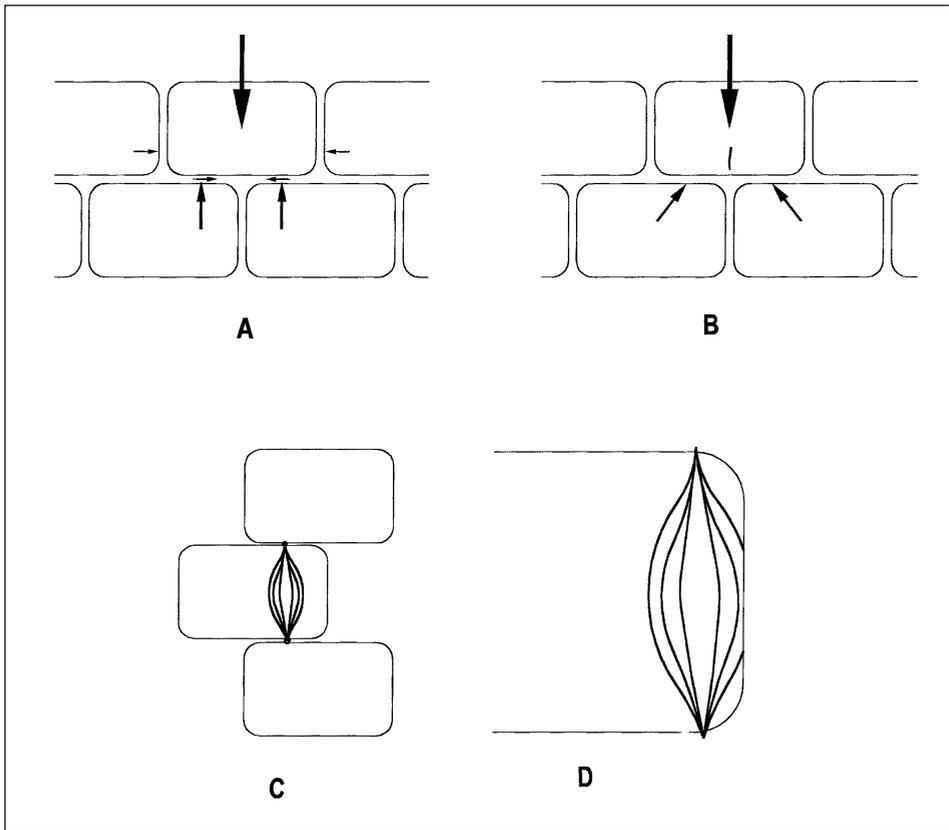


FIG. 23.—*Direcciones de tracción en sillares con fracturas.*

- Por la fábrica, entendida como una masa continua uniforme, bajaría la carga siguiendo un flujo laminar pero cualquier estrechamiento, como son los redondeos de las aristas de los sillares, altera ese flujo ordenado y es otra fuente de tracciones horizontales, aunque, en este caso, sólo alcanzan entre $1/5$ y $1/3$ de la compresión media (Fig. 23 C).
- La pérdida de mortero o el nacimiento de una grieta concentra el paso de las compresiones en los estrechamientos y llega a triplicar sus valores medios⁵⁰.

50 El equipo dirigido por Jaime Cervera (ver CERVERA, Jaime; HERNANDO, José Ignacio y DE LA TORRE, Juan Francisco. *Acueducto de Segovia. Comportamiento mecánico*. Dpto. de Estructuras de Edificación. E. T. S. de Arquitectura. U. P. de Madrid, 1994) analizó este tipo de roturas en los sillares del Acueducto de Segovia donde, como en tantos otros sitios, se produce este daño común. Los valores comentados en este informe se han extraído de ese trabajo.

De aquí se concluye que, analizada la fábrica y determinada la tensión de compresión que se produce en ella como si fuera un medio continuo en el que no hubiese sillares y morteros, ni estrechamientos, ni imperfecciones; la posibilidad de fractura aparece, bien por la primera causa, cuando la resistencia a tracción del material iguala a esa tensión de compresión, o bien por la tercera, cuando la resistencia a compresión del material, se triplica localmente.

Algunos sillares están muy alterados en superficie (Fig. 24). Naturalmente, esto es motivado por la degradación química que, cuando produce compuestos con más volumen, deshoja al material. Pero aunque no se produzcan aumentos de volumen por razones químicas, cuando hay deshojamiento las inclinaciones del flujo de compresiones produce tensiones de tracción horizontal en los bordes de los sillares. Si imaginamos que el haz de líneas de compresión representado estuviera cerca del borde (Fig. 23 D), cualquier actividad química cerca de la superficie que fuera haciendo perder cohesión a esa zona de la piedra acabaría separando las capas exteriores. Esto está relacionado con la segunda causa de las citadas en el apartado anterior.



FIG. 24.—Alteración de la capa superficial en algunos sillares del puente Mayor de Salamanca.

Los datos de la resistencia de los materiales del puente se resumen en la siguiente tabla, en la que se reflejan tensiones de rotura medias y mínimas de interés⁵¹.

51 Estudio petrológico, físico y químico del puente dirigido por M^a Ángeles Vicente, del Departamento de Petrología de la Universidad de Salamanca que incluye resultados de rotura de los materiales. Han roto probetas de granito de grano fino, grano grueso, rosado, arenisca silíceas y de Villamayor; a compresión, a flexotracción y a tracción (ensayo brasileño).

TABLA I.—*Resistencia de los materiales*

ROCA	COMPRESIÓN	TRACCIÓN		
		FLEXOTRACCIÓN	TRACCIÓN	MÍNIMA
Granito grueso	516	–	17	35
Granito fino	714	35	48	–
Granito rosado	661	108	45	–
Arenisca silíceas	486	112	67	22
Arenisca Villamayor	165	71	25	–

El puente nuevo, construido con arenisca caleña (silíceas), se vio en el epígrafe 4 que alcanzaba tensiones medias de compresión de 17 kp/cm². Considerando que el deterioro triplica ese valor, resultan posibles tensiones máximas locales de 51 kp/cm². Como las tensiones de rotura del material por compresión han sido de 486 kp/cm², la resistencia de la piedra es diez veces superior a los máximos esfuerzos esperables por deterioro, luego no hay problema. En cuanto a la tracción, cabe la aparición de tracciones similares a las de compresión media (17 kp/cm²), muy lejano a los valores de rotura de la tabla anterior (del orden de 112 kp/cm² a flexotracción y 67 a tracción). Sin embargo, se han producido roturas en los ensayos realizados (posiblemente en piezas debilitadas o de baja calidad) de sólo 22 kp/cm², lo que explica que algunos sillares del puente hayan roto, dada la cercanía entre los valores de 22 y 17. También explica el bajo nivel de daños, ya que queda limitado a las piezas débiles.

En cuanto al romano, las relaciones en compresión son muy superiores a lo anterior por ser más elevada la resistencia del granito, mientras que, en los problemas de tracción, se mantiene la misma situación que en la arenisca ya que sus tensiones de rotura son similares.

Por tanto, la probabilidad de rotura aislada de algunos sillares es similar en ambos puentes y como el puente romano lleva mucho más tiempo construido, el número de sillares rotos deberá ser mayor que en el del XVII.

7. AGRIETAMIENTOS VERTICALES DE ALGUNAS BÓVEDAS ROMANAS

Varias bóvedas del puente romano tienen una larga grieta casi vertical que, si fuera completa, separaría al puente en dos partes, la de aguas arriba y la de aguas abajo.

Esta grieta es más ancha arriba, está más cerca de la cara de aguas abajo y describe una línea que se acerca algo más a esta cara en la parte superior. Ha producido la rotura de algunos sillares, pero menos de lo que resultaría si el trazado siguiera, lo que podríamos llamar, la línea directriz de la grieta, ya que se aprecia que muchos sillares se han removido a un lado o al otro de la falla en lugar de

partir por medio. Con ello han forzado a que la trayectoria de la grieta siga frecuentemente el trazado de las juntas.

Las dos partes de esta rotura están al mismo nivel horizontal, o sea, no hay un descenso relativo entre ambas partes del puente. De nuevo, la marca del tiempo: el agrietamiento, que alcanza a veces varios centímetros, tiene los labios redondeados y ha sido taponado con piedrecillas de pizarra y, si el sitio es grande, con arenisca.

El origen de este daño se debe a situaciones críticas ocurridas durante las grandes avenidas. El agua empujando al puente no lo dividiría en dos partes pero succionándolo a su paso por él, fundamentalmente con los remolinos en la cara trasera, veremos que esta rotura es posible.

Para ello basta imaginar que tomáramos el puente con la mano, lo pegáramos por su cara de aguas arriba a un techo suficientemente resistente y lo dejáramos colgando, incluso con pesos añadidos en la parte inferior que representen la succión del agua en la cara de aguas abajo. Naturalmente, como la fábrica no resiste casi tracciones y los sillares sí, el puente se nos caería del techo, piedra a piedra ya que se descolgaría por las juntas. Pero, puestos a imaginar, supongamos aumentada la resistencia a tracción de sillares y juntas, para que no llegue a caer. Si en esta situación, fuera perdiendo esa resistencia imaginada paulatinamente para que pudiéramos observar lentamente el desprendimiento, llegaría un momento en que los sillares empezaría a deslizarse entre sí al ir fallando las juntas y, posiblemente en algún caso, se rompería algún sillar de peor calidad.

Descolguemos ya el puente del techo devolviéndolo a su sitio pero recordando que el agua está llevándose. El peso del puente y el rozamiento no dejarían moverse nada libremente en la dirección horizontal de la corriente aunque la resistencia a tracción de las juntas sea casi nula. De modo que el rozamiento equivale al aumento ficticio de resistencia a tracción imaginada antes.

Queda justificar por qué los sillares se han separado o roto por una línea casi vertical en lugar de por cualquier parte, lo que excede a las limitaciones de este trabajo, pero puede explicarse aceptablemente. Con la succión aplicada en la cara trasera, lo razonable sería que los sillares de esa cara de aguas abajo fueran los que saltaran pero, al no haber ocurrido así, quiere decir que sólo esa succión no fue suficiente para superar al conjunto peso-rozamiento de esa fachada de sillares. Hizo falta una fuerza mayor, conseguida sumando a lo anterior la succión producida por el roce del agua en una cierta cantidad de la superficie del interior del puente. Esa fuerza de succión aumenta cuanto más superficie de intradós de puente se tome, pero el peso involucrado también crece y, en consecuencia, la línea en la que se produce el desmembramiento es aquella en que el tiro del agua equilibra a la componente horizontal del peso-rozamiento.

Esto, con lo que quedan completadas las causas de los daños detectados en el puente, es lo que yo diría que ocurrió, posiblemente, en la noche del 26 al 27 de enero de 1626, día de San Policarpo.

BIBLIOGRAFÍA

- ARAMBURU-ZABALA, M. Ángel. *La arquitectura de puentes en Castilla y León. 1575-1650*. Valladolid: Junta Castilla-León. Consejería de Cultura y Turismo, 1992.
- ALZOLA Y MINONDO, Pablo. *Historia de las Obras Públicas en España*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1994
- BENET, Nicolás. *Informe sobre el puente romano de Salamanca*, julio 1986
- BUENO HERNÁNDEZ, Francisco. Los caminos históricos de la provincia de Salamanca hasta el siglo XV. En *Revista OP*, número 25, Madrid: Colegio de Caminos Canales y Puertos, 1993.
- CERVERA, Jaime; HERNANDO, José Ignacio y DE LA TORRE, Juan Francisco. *Acueducto de Segovia. Comportamiento mecánico*. Dpto. de Estructuras de Edificación. E. T. S. de Arquitectura. U. P. de Madrid, 1994.
- CHÍAS, Pilar; ABAD, Antonio. *Puentes de España*. Madrid: Fomento de Construcciones y Contratas, 1994.
- Destrozo en el puente romano de Salamanca. En *Revista Koiné*, 1986.
- DURÁN FUENTES, Manuel. Puentes romanos peninsulares: tipología y construcción. En *Actas I Congreso Nacional Historia de la Construcción*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, E. T. S. de Arquitectura de Madrid, CEHOPU, CEDEX, Ministerio de Obras Públicas, 1996.
- FERNÁNDEZ CASADO, Carlos. *Historia del puente en España. Puentes Romanos*. IETCC.
- FORTEA LUNA, Manuel y LÓPEZ BERNAL, Vicente. *Bóvedas extremeñas. Proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista*. Badajoz: Colegio Oficial de Arquitectos de Extremadura, 1998.
- GARCÍA DE LOS RÍOS COBO, J. I. y BÁEZ MEZQUITA, J. M^a. *La Piedra en Castilla-León*. Valladolid: Junta de Castilla-León, 1994.
- GARCÍA ORTEGA, Pedro. *Historia de la legislación española de Caminos y Carreteras*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1982.
- GÓMEZ MORENO, Manuel. *Catálogo Monumental de España. Provincia de Salamanca*. Valencia: Ministerio de Educación y Ciencia, 1967.
- GONZÁLEZ DE ÁVILA, Gil. *Historia de las Antigüedades de la Ciudad de Salamanca. Vidas de sus obispos y de las cosas sucedidas en su tiempo*. 1606. Facsímil. Universidad y Diputación de Salamanca, 1994.
- GONZÁLEZ IGLESIAS, Lorenzo. El Río, el Toro y la Puente. En *El Museo. Crónica Salmantina I*. Salamanca, 1957.
- Guía de puentes de España. En *Revista del MOPU*, nº 345, jul/ago 87, Madrid.
- HERRÁEZ HERNÁNDEZ, José María. El puente romano de Salamanca y la riada de 1499 según el manuscrito de José Iglesias de la Casa. En *Actas del I Congreso de Historia de Salamanca*. Salamanca, 1992, tomo II.
- HEYMAN, Jacques. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera y E.T.S. de Arquitectura de Madrid, 1995.
- HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago. *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España. ca 1500- ca 1800*. Tesis doctoral. E. T. S. de Arquitectura. U. P. de Madrid, 1990.
- JIMÉNEZ FUENTES, Emiliano y MARTÍN DE JESÚS, Santiago. Sobre el material empleado en la reconstrucción del puente romano de Salamanca, durante el siglo XVII. En *Actas del I Congreso de Historia de Salamanca*. Salamanca, 1992, tomo II.

- MAJADA, Jesús y MARTÍN, Juan. *Viajeros extranjeros en Salamanca 1800-1936*.
- MENDILUCE, José M^a y HERAS, Rafael. Criterios y experiencias de la regulación de los ríos. Estudio de máximas crecidas. En *Grandes presas. Experiencias españolas en su proyecto y construcción*. Comité Nacional Español de grandes presas. MOPU, 1976.
- O'CONNOR, Colin. *Roman Bridges*. Cambridge University Press, 1993
- ROLDÁN HERVÁS, José. Manuel. *Iter ab Emerita Asturicam. El camino de la Plata*. Salamanca, 1971.
- RUPÉREZ ALMAJANO, María Nieves. *Urbanismo de Salamanca en el siglo XVIII*. Salamanca: Colegio Oficial de Arquitectos de León. Delegación de Salamanca, 1992.
- VILLAR Y MACÍAS, Manuel. *Historia de Salamanca*. 1^a edición Salamanca, 1887, reimpresión, Salamanca: Graficesa, 1973, libro I.
- ZUFIAURRE GOICOECHEA, Saturnino. Puente sobre el río Tormes en Salamanca. En *Revista de Obras Públicas*, Madrid, 1903.