

## Aportación al estudio de los puentes romanos peninsulares: análisis de la capacidad de desagüe de varios puentes de Gallaecia

Manuel Durán Fuentes

Para saber cuál era el nivel de conocimientos que tenían los ingenieros romanos sobre el comportamiento hidráulico de los ríos a su paso por estas obras de fábrica y sus consecuencias, sólo podemos especular ya que ninguno de los tratados técnicos conservados, como *Los Diez Libros de Arquitectura* de Vitrubio,<sup>1</sup> las obras de Frontino<sup>2</sup> o las de Plinio el Viejo,<sup>3</sup> han abordado el tema. Hasta qué punto esta cuestión influía en el diseño de los puentes de aquella época, tampoco es conocida.

Para abordar el tema hemos analizado los conocimientos que hubo sobre la hidráulica del río y el puente en distintas épocas, contenidos en tratados de autores diversos, que nos han permitido apreciar el lento desarrollo que tuvieron en comparación con otros saberes del ingeniero. Hubo que esperar mucho tiempo para que la recogida sistemática de datos de los ríos y de la hidrometeorología de sus respectivas cuencas, así como el desarrollo científico, permitiese al ingeniero civil disponer de métodos y fórmulas, de carácter empírico, que le ayudaran a conocer, con una relativa precisión, el comportamiento del río durante sus crecidas y a mejorar, por tanto, el diseño de los puentes y su durabilidad.

Una vez realizado este análisis y llevando hacia atrás en el tiempo los resultados obtenidos, hemos planteado, a nivel de hipótesis, los posibles conocimientos hidráulicos existentes en época romana. Finalmente hemos intentado comprobar la validez de nuestras hipótesis analizando el comportamiento hidráulico de varios ríos de *Gallaecia*<sup>4</sup> a su paso por

los puentes elegidos, y si éste pudo influir en sus diseños y construcción.

### DESARROLLO HISTÓRICO DE LOS CONOCIMIENTOS SOBRE EL DESAGÜE DE LOS PUENTES

En el diseño de los puentes construidos «antes de los ingenieros», en palabras del profesor Jean Mesqui,<sup>5</sup> se empleaban, generalmente, determinadas reglas proporcionales o geométricas, extraídas de la experiencia constructiva de muchos años que hundía sus raíces en los grandes logros de la época romana. Durante el Medioevo desapareció de la práctica normal la técnica y maestría que caracterizó a los constructores romanos, arrastrada por la decadencia de las ciudades y la «ruralización» de la sociedad (por lo menos hasta el siglo X).<sup>6</sup> Lo que de ella quedó se conservó y transmitió en el seno de cuadrillas de operarios constructores que se desplazaban por toda Europa allí donde sus servicios fuesen solicitados, al frente de los cuales se hallaba un maestro constructor, cantero o carpintero, que celosamente pasaba sus conocimientos a hijos o allegados más directos, generación tras generación.

Uno de los primeros tratados de esta época altomedieval, es el documento extraído del *Mappae Claviculae*,<sup>7</sup> titulado *Dispositio fabricae de pontibus*, que poco nos sirve para nuestro propósito ya que solo trata de la cimentación de los puentes.

Es a partir de los siglos X y XI cuando Europa recobra el impulso constructivo, gracias a muchos fac-

DATOS GENERALES DEL PUENTE				ALTURA DEL PUENTE		BOVEDAS DEL PUENTE		FORMA	RASANTE	PILAS		CUENCA DEL RÍO		VELOCIDAD DEL AGUA		PASO BAJO ARCADAS		PASO SOBRE LA OBRA	
Nombre	Río	Comuna	Ciudad/Prov.	Cauce-resaca	Cauce-limite	Luces (m.)	Forma			N°	Espesor (m)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Caída (m/7)	Agua arriba (m/s)	Agua abajo (m/s)	Caída (m)	Caída libre (m)	Caída agua arriba	Altura sobre la obra
P. San Miguel	Armen	Via Novia # 18	Cerro de Antioquia	10,00	7,40	3,20-8,40 (7)	1/2 punto	horizontal	1	6,7	16,70	115,00	2,45	6,64	4,45	2,75	xxx	xxx	
P. de Pedro	Tunja	Via # 17 del E. Antioquia	Torre de Dona Concepcion	8,00	6,90	8,50-10,5-45	1/2 punto	horizontal	5	2,50-2,60-2,50	565,00	1348,00	2,41	3,05	xxx	xxx	8,85	0,43	
P. de Chaves	Yamagó	Via # 17 del E. Antioquia	Yamagó	4,20	4,10	5,25 (basta 60 metros)	1/2 punto	horizontal	15	2,85-2,30 a 1,90	385,00	1880,00	2,70	2,18	xxx	xxx	8,70	2,05	
P. de Andujar	Cáceres	Via # 17 del E. Antioquia	Yamagó	8,52	8,40	10 vano de 7,5	1/2 punto	horizontal	xxx	xxx	103,00	412,00	1,85	2,91	xxx	xxx	9,7	1,18	
P. Piedra	Limón	Via Novia # 18	Yamagó	15,00	13,50	14,70-5,12	Rebajado	horizontal	1	7,4	897,00	1743,00	3,03	6,30	xxx	xxx	14,94	1,94	
P. Pavo	Arma	Via Rocca-suena	Cebalosa	9,00	8,00	4,75-7,8-7,0-4,74	1/2 punto	horizontal	3	2,83-3,82-2,80	535,00	1284,00	3,28	5,43	xxx	xxx	17,05	3,85	
P. Vaso de Lugo	Méjico	Via # 19 del E. Antioquia	Yamagó	9,80	7,90	4 de 10,4 y mas 4,70 y 5,30 (7)	1/2 punto	horizontal	7	2000 en forma a 4,40	2303,00	3445,00	2,21	2,21	xxx	xxx	15,2	6,40	
P. Jairo	Nivara	Via Novia # 18 del E. Antioquia	Cebalosa	12,90	11,90	de 10,00-10,00-10,00 (9 m E)	1/2 punto	horizontal	xxx	xxx	218,00	674,00	3,34	8,64	7,74	3,08	xxx	xxx	
P. Jairo	Béjar	Via Novia	Cebalosa	25,40	23,90	3,65-18,80-8,70	1/2 punto	horizontal	2	4,40-4,33	1255,00	3371,00	6,03	4,34	15,47	8,03	xxx	xxx	
P. de Ciénaga	Si	Via Novia	Cebalosa	21,00	19,50	5,20-20,9-5,71	1/2 punto (E y Rebajado) (7)	horizontal	3	11,50-4,70-5,40	4314,00	5613,00	6,51	10,70	xxx	xxx	33,28	2,28	
Ca. Portos o A. Ruybalgo	Si	Via Secundaria	Soledad	25,80	23,00	12,80-13,40-24,80-4,40	1/2 punto	bases cuadradas	4	2,40-3,40-2,40-2,00	3800,00	4740,00	7,80	10,51	xxx	xxx	27,13	7,33	

(\*) Reconstrucción hipotética del puente

Figura 1

Cuadro resumen de las características constructivas y del desagüe de los puentes analizados

tadores favorables, entre los que destacamos el desarrollo de nuevas tecnologías y formas constructivas como el arco apuntado u ojival, el empleo de fuentes de energía alternativas (la hidráulica), la aparición de los gremios y el renacer del fenómeno urbano. De esta época, comienzos del siglo XIII, se conservan los folios o «carnets» de Villard de Honnecourt,<sup>8</sup> experto arquitecto o/y constructor francés, en los que dibujó y comentó parte de los saberes y del pensamiento técnico de la época. A partir del siglo XII, se reinicia la construcción de puentes de forma notable, utilizándose más la madera que la piedra. Villard aporta un curioso diseño de un puente de madera, de unos 25 metros de luz, que, como dice el comentario anexo, «de este modo se hace un puente por encima de agua con piezas de madera de 20 pies de largo». El hecho de no indicar a qué altura debía ser construido parece señalar que los escasos conocimientos hidráulicos de la época no afectaban al diseño de estas obras, aunque es seguro que normalmente se dispusiesen por encima de la máxima avenida, pues este condicionante ya debió estar presente ya en la construcción de los primeros puentes de la Historia.

Durante la fase de proyecto de un puente en el Medioevo, los maestros de obras solían discutir, casi exclusivamente, sobre sus relaciones geométricas, el lugar de implantación, el tipo de cimentación a ejecutar según el terreno y el modo de construirla. Parece lógico pensar que, previamente, se establecía la rasante de la plataforma por encima de las mayores avenidas que se tuviese recuerdo, pero no siempre ocurría esto pues se conocen casos donde la concreción del perfil longitudinal se realizó una vez cons-

truidas las pilas y los estribos. Según J. Mesqui, esta toma de decisiones según iba avanzando la obra era lo normal en este tipo de obras, pues la fase previa de proyecto, apoyada en la realización de bocetos o croquis, planos y/o maquetas, era de poca importancia, sobre todo en las obras grandes, y se limitaba prácticamente a cuestiones constructivas y financieras. Hay que esperar al siglo XVII para que se tengan en cuenta otras cuestiones, como las hidráulicas, y para que se representen en los planos de proyecto algunos detalles como el nivel de las aguas normales y de las grandes avenidas.

Resumiendo, los maestros de obras medievales que construían puentes trataban, sin duda, de minimizar la obstrucción que ellos suponían en el cauce, para lo cual trataban de cerrar sus arcos por encima de la mayor avenida y a una altura que solo su experiencia les permitía determinar. Hacían uso de alguna recomendación muy extendida, como aquella que propugnaba construirlos con un número par de pilas para que ninguna de ellas se construyese en medio del cauce, de que la obra no fuese, a ser posible, esviada con respecto a las líneas de corriente principales o la que aconsejaba construir un único arco, el más grande que se pudiese y a una buena altura en aquellos lugares, sobre todo montañosos, donde pudiesen producirse crecidas torrenciales.

Durante el Renacimiento se publicaron diversos tratados, sobre todo de arquitectura, en los que se hallan recomendaciones sobre la disposición y la construcción de puentes, ya que en aquella época las obras públicas estaban incluidas en el ámbito de la arquitectura. Uno de los autores más conocidos es



Figura 3  
Ponte de Arquinho

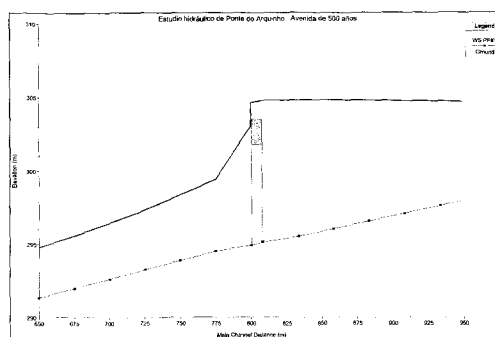


Figura 4  
Ponte de Arquinho

arroyo (...) será muy sano hazer unos arquillos aun- que ellos sean bajos, con tal que las crecidas no sean de tal manera que sobrepuje las vueltas de los arquillos,...»; las crecidas debían pasar por dentro de los arcos, con un nivel inferior a su parte superior para evitar su ruina. Más adelante recomienda que «en el repartir los arcos conviene tener cuenta de nunca poner pilar en el medio del valle o barranco» no únicamente por el peligro que suponen sino también porque «no parecen bien a la vista». Desconfía de la fuerza de las aguas en los ríos, pues a estos «furores del agua no ay cosa que le pueda resistir (...), y esto se puede ver en lo de las puentes que son hechas de piedra en la parte baja de la puente ordinariamente les vemos las pilas socavadas en aquella parte (...)». Da conocimiento de lo que acontecía con el puente de Adriano en Roma, ya que la acumulación de «grandissimas inundancias o broças, así de ramas como de troncos de arboles» disminuye el desagüe de los arcos y el agua «haze grandissima resistencia y continuo tesón y cargamiento de modo que el agua en aquel lugar viene a caer de alto y haze entonces grandes piélagos o remolinos tan impetuosos que parece que cae de una grandissima altura, y andanse rebolviendo alrededor de las pilas, de modo q' las va cavando». Relaciona sabiamente la velocidad del agua del río con la pendiente de su cauce, y apunta la variación de la velocidad con la profundidad del río, cuando escribe que «el mayor rigor q' lleva el agua es de medio arriba, como si dixesemos que el rio es veynte pies de alto, los diez mas altos lleva mucho rigor que no hazen los diez de enmedio abajo y la experiencia nos lo demuestra en diversas cosas en espe-

cial en las pilas de las puentes que nunca se gastan a rayz del suelo del rio mas gastanse mas donde toca la superficie del agua, ...».

En los libros quince y dieciocho escribe sobre los diversos tipos de puentes, como los provisionales, en los que se emplean distintos elementos de flotación como barcas, odres hinchados y toneles, y los puentes de madera fijos, para cuya construcción da una serie de consejos para el desagüe, la mayor parte extraídos del tratado de Alberti. En primer lugar la implantación del puente debe hacerse en una zona «...que sea muy cómodo a todos...», ancha y que en sus proximidades haya un vado y que «el agua vaya mansa,...no tenga remolinos ni que aya grandes poços».

Los puentes pueden ser de madera o de piedra, teniendo especial cuidado en los primeros ya que el agua de las crecidas no debe llegar a las estructuras de madera de la plataforma, pues si así fuese «sería un daño muy manifiesto». Para la construcción de las pilas de los puentes de piedra también aconseja buscar una buena cimentación «pudiendo hallar tal asiento y q' ello sea de peña». En cuanto a la disposición escribe, siguiendo a Alberti, que «los arcos siempre se deven hazer nones y no pares al revés de las pilas, ...» pues así «... jamas ninguna viene en el medio del rio...». El arco central debe ser de mayor tamaño pues permite el paso de los arrastres, ya que se evita obstruir el río allí donde es más profundo, y es más fácil cimentar las pilas centrales. El resto de las pilas deben construirse en aquellos lugares «donde el agua sea mas mansa».

Aconseja que «la obra ha de ser levantada en alto por amor de las crecidas de los ríos». Los arcos han



de ser de medio punto, «... que es el mas fuerte de todos...», pero debe rebajarse («arco de punto hurta-do») cuando el arco es muy grande con respecto a la altura de la pila. En cuanto a las reglas geométricas de composición reproduce las que estableció Alberti un siglo antes.

Como se aprecia en estos dos tratados apenas hay avances en los conocimientos hidráulicos de las avenidas, con respecto a los que tenían, muy probablemente, los maestros de obras del Medievo; pero es a partir de esta época cuando la hidrodinámica y la hidráulica experimentan un gran desarrollo, entre otras razones, por la aparición de los ingenieros del rey, distintos pero muy próximos a los arquitectos, especialistas en las diversas «artes» de la guerra —construcción de fortificaciones, máquinas de guerra, desarrollo de la artillería, etc.— en la mecánica, y en hidráulica, que tendrán un papel fundamental en la construcción de las obras públicas.<sup>13</sup> La existencia de estos técnicos especializados en los aspectos hidráulicos de las obras y la toma de conciencia que los puentes debían tener el suficiente desagüe que permitiese el paso de las grandes avenidas bajo sus arcos (por ejemplo el ministro francés Colbert en 1679 da instrucciones al ingeniero Poictevin para que se tomen las mayores crecidas de los últimos 15 años, no la última que se tuviese noticia provocó que la construcción de puentes, como la de canales y caminos, derivase, a lo largo del siglo XVIII, hacia el ámbito de la ingeniería, que se consolidó como un nuevo arte constructivo más especializado, abandonando, progresivamente, la esfera de la arquitectura.<sup>14</sup> Este proceso se manifiesta primeramente en Francia desde la segunda mitad del siglo XVII, bajo la autoridad del citado Colbert que organiza un cuerpo facultativo de ingenieros al servicio de la administración del estado. En un proceso de mayor presencia e intervención, los ingenieros serán los encargados, a partir de entonces, de la redacción de los proyectos, más normalizados y detallados, consiguiendo con ello facilitar el proceso de adjudicación, disminuir el coste y mejorar la calidad de las obras públicas. El mayor nivel de los conocimientos teóricos impulsados por la creación de estos nuevos cuerpos de facultativos y por las escuelas politécnicas que los formaban, mejoró el que se tenía de la hidráulica de los ríos y el puente, aunque habrá que esperar más de un siglo hasta que se obtengan algunos modelos y fórmulas que permitan calcular la sección ideal de desagüe de las obras de fábrica.

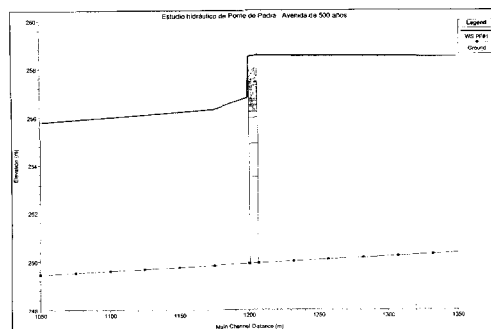


Figura 5  
Ponte de Pedra

Fue en 1714 cuando apareció el primer tratado específico sobre construcción de puentes, escrito por el francés Henri Gautier que lo tituló expresamente *Traité des ponts*.<sup>15</sup> En el capítulo IV escribe sobre los proyectos que, según este autor, deben comenzar con la realización de los planos de planta y alzado, marcando el lugar de construcción, las orillas y los caminos o calles que llegan al puente. Se dibuja el puente elegido, ya sea de piedra o de madera, con el número de arcos y de pilas que se determine, con su eje longitudinal ortogonal a la corriente del río, evitando los esviajes ya que dificultaba el corte y la talla (estereotomía) de los sillares de la fábrica. A continuación, una vez fijado sobre el terreno el lugar elegido para la construcción del puente y su eje longitudinal, se realizarán los sondeos que permitirán conocer y dibujar el perfil transversal del cauce.

El proceso continúa con el estudio de la consistencia del terreno mediante las oportunas penetraciones de taladros metálicos o pilotes de madera, para conocer el plano de cimentación y poder elegir su tipo.

Por las informaciones de los vecinos del lugar elegido se conoce la altura de las mayores inundaciones de las que tuviesen recuerdo, que también se refleja en los planos del proyecto. Informados de la cantidad de agua que trae el río en época de crecidas, aconseja hacer los arcos lo suficientemente grandes para poderlas contener, trazándolos de modo que el intradós de las bóvedas en la clave debe estar tres pies por encima de la cota de la mayor avenida. Es deseable que todos los arcos del puente cumplan esta regla mínima, pues hay casos que solo la cumple el arco central.

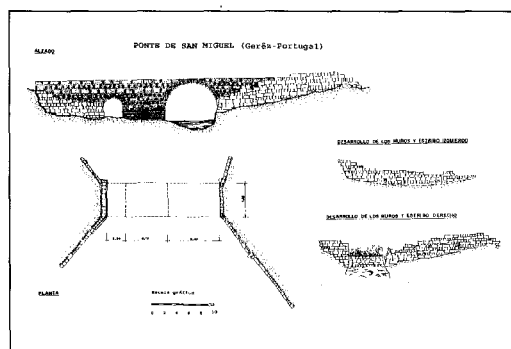


Figura 6  
Puente de San Miguel

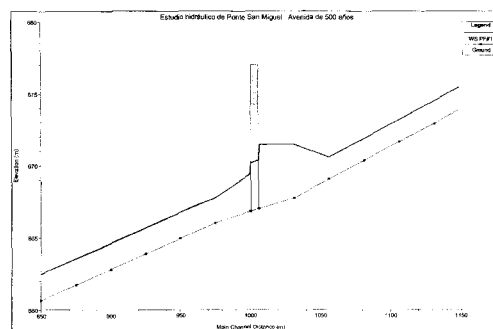


Figura 7  
Puente de San Miguel

Sigue Gautier precisando que «las pilas disminuyen la anchura del cauce del lecho ordinario de los ríos, lo que produce además que las aguas sean aceleradas bajo los arcos. Los ríos entonces excavan entre las pilas, bajo los arcos, de manera que profundiza su curso en función de lo que ha disminuido o quitado a su anchura». Aconseja no proyectar nunca puentes en lugares estrechos, «a menos que se puedan cimentar en roca y que se tomen precauciones extraordinarias». Establece, erróneamente, una relación inversamente proporcional entre la disminución del ancho del cauce por la construcción de las pilas y el aumento de la velocidad, es decir que si se reduce 1/5 la anchura del río, se aumenta la velocidad del agua 1/5 también, por lo que si se amplía la anchura total del puente en la misma proporción que la disminuye las pilas, no se aumentará la velocidad.

A pesar de lo precario y erróneo de estos planteamientos, vemos que ya hay algunos notables avances en los conocimientos hidráulicos. Por ejemplo ya plantea el hecho real de que el caudal de un río en un punto depende de la pluviometría de la zona, que ya por aquella época se empezaron a hacer observaciones y anotar las precipitaciones anuales en puntos como París, Saint-Malo o Lyon, expresándolas en alturas de agua (pulgadas y líneas de pie).<sup>16</sup> Los diferentes valores permitían, haciendo una media aritmética, obtener la pluviometría del territorio comprendido entre estas estaciones. Parte del agua caída es consumida por el viento, el sol, la tierra y las plantas, y el resto corre por los valles, arroyos y ríos, pasa por debajo de los puentes y termina en el mar. «Si se mide sobre un buen mapa la extensión del país que recoge todas las aguas

que desaguan en el río sobre el cual se ha construido un puente...», se obtienen unas superficies, que para el Ródano en Lyon es de 800 leguas cuadradas y del Tíber en Roma de 1.100. Por este medio, continua escribiendo, sobre los mapas se verá la diferencia entre los diversos ríos y la mayor o menor cantidad de agua que pasa bajo los puentes. Si se cubica el agua al multiplicar la superficie de la cuenca por la altura de la lluvia registrada, se obtendrá la cantidad de agua anual que pasa bajo el puente, una vez que se le reste la que los vientos, el sol, las plantas, etc. pueden disipar.

Esta manera de calcular teóricamente la avenida de un río a su paso por un puente es correcta pero todavía imprecisa. Hoy sabemos que efectivamente el caudal está directamente relacionado con la superficie de la cuenca y con el coeficiente de escorrentía, que representa el porcentaje de agua, caída en forma de lluvia, que llega al puente. También es correcto el establecimiento de la relación del caudal con la lluvia, y así está reflejado en muchas fórmulas actuales que relacionan directa y proporcionalmente el caudal y la precipitación. Gautier alienta a la recogida de datos pluviométricos en todas las regiones del país, así como a la elaboración de una buena cartografía. Para Gautier estos nuevos planteamientos frente al problema del desagüe «parecen servir a una persona que proyecta un puente, para determinar la abertura de los arcos», aunque, reconociendo la dificultad de conocerlos de forma precisa, manifiesta a continuación, que no sean tenidas en cuenta en el diseño y en la construcción de los puentes, por ser solo curiosidades, y que el ingeniero cuente con el testimonio de los más ancianos del lugar que es más seguro.

En la bibliografía española del siglo XVIII hay un tratado específico sobre la llamada arquitectura hidráulica, escrito entre los años 1759 y 1768 por el P. Pontones. Lo tituló *Architectura hydraulica en las fabricas de puentes. Methodo de proyectarlo y repararlos. Instrucción a los maestros de quanto conviene saber para executar esta calidad de obras*.<sup>17</sup> Para este autor español el puente es un «camino sobre las aguas» que por la necesidad de resistir la acción persistente de las aguas, su construcción ofrece en la práctica mayores dificultades que la obras de arquitectura civil. Este tratado sin embargo no aportó nada nuevo al tema del desagüe, pues solo recomienda la aplicación de una «máximas preliminares»,<sup>18</sup> que ya antes las habían recogido otros autores. Recomienda el número impar de arcos y que la altura de las claves y los diámetros de los arcos de modo sean suficientes para desaguar las grandes avenidas evitando exageraciones y que, a ser posible, esta medida se aplique a todos los arcos y no sólo al central. Otras recomendaciones también dadas por el P. Pontones es que los salmeres se colocasen a nivel o algo más elevados que la altura media de las aguas, que los tajamares se levantasen, por lo menos, hasta el zócalo de los pretiles, y que los desagüaderos se ejecutasen cuadrados o circulares para aumentar el desagüe en «tiempos de las crecientes». Recuerda que el tamaño de las diferentes partes del puente será el necesario para resistir los esfuerzos pero también deberá ser el mínimo para que no ocluyan excesivamente el desagüe, cuestión que el P. Pontones zanja escribiendo que se resolverá conciliando estas dos circunstancias opuestas. Muestra su convencimiento de la bondad del engrapado y emplomado de los sillares para aumentar la resistencia de la fábrica frente a las riadas, a pesar de las críticas por su excesivo coste.

Suponemos que conocía las obras de Gautier, ya que ambos autores coinciden en muchas de las recomendaciones incluidas en sus tratados, sobre todo en aquellos párrafos donde instruyen sobre la forma de redactar los proyectos y cual debía ser el contenido de los mismos. También parece que conoció alguna edición de *Los veintitún libros de los ingenios y de las máquinas*, por la misma razón, ya que recoge, por ejemplo, la misma disposición constructiva de ejecutar unos arcos invertidos en aquella cimentación que se quiera realizar corrida por la mala calidad del terreno.

Sus observaciones y estudios sobre la construcción de puentes le llevan a la conclusión de que «el arte

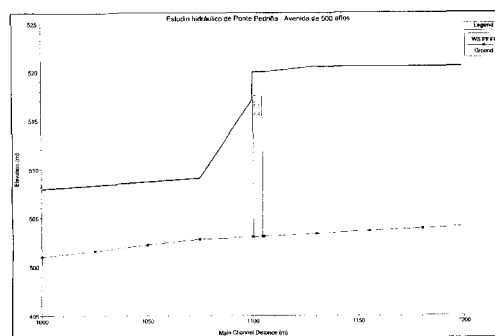


Figura 8  
Puente Pedriña

de levantar estas fábricas si consultamos el que se ha practicado en muchos puentes antiguos y modernos le hallaremos tan vago, aventurado y de tantas maneras cuantas fueron las particulares ideas de cada maestro», palabras que reflejan los pocos conocimientos teóricos que sobre el diseño de puentes tenían los maestros de obras y los técnicos españoles del siglo XVIII, que exclusivamente basaban sus realizaciones en la práctica heredada y en sus propias experiencias.

Aunque, como hemos visto, sobre el tema del desagüe de un puente apenas hallamos vagas referencias, no faltan, en cambio, otros libros que tratan abundantemente sobre hidrodinámica e hidráulica, en los que se exponen los avances teóricos y prácticos de otras obras, como los azudes y redes de regadío, los canales de navegación, las nivelaciones para la conducción de las aguas, y sobre todos las máquinas y artificios hidráulicos, que era la parte que más interesaba a los ingenieros.

Estas imprecisiones y falta de conocimientos teóricos que impedían el cálculo del caudal de las avenidas, todavía se mantenían a finales del siglo XIX y principios del XX. En 1888 el ingeniero francés M.E. Degrand escribía, con desaliento, en su obra «Ponts en maçonnerie»,<sup>19</sup> que no esperaba que los ingenieros llegasen a conocer de forma precisa la hidráulica del río en su relación con los puentes. Consideraba muy difícil saber, por ejemplo, las relaciones entre la superficie de la cuenca de un río y el desagüe de los puentes construidos en su recorrido, las condiciones de circulación de las aguas bajo los puentes, la formación y la propagación de las avenidas, el cálculo de sus caudales, etc., ya que, en opinión de Degrand,

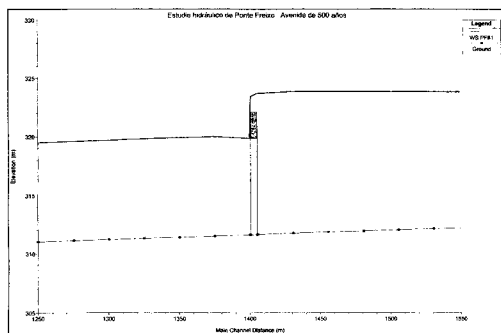


Figura 9  
Ponte Freixo

son muchos y muy variables los factores a tener en cuenta, como la naturaleza y composición de los terrenos de la cuenca, la variedad de pendientes y su grado de permeabilidad, la forma del cauce, la situación de los afluentes y el volumen de sus aguas, la configuración del valle o valles cuyas aguas pueden verter y la influencia en la elevación del nivel de las crecidas por los remolinos producidos por un puente y sobre todo por los rellenos de los diques paralelos al río, etc.

Consideraba que la evaluación de estos factores era muy complicada ya que se presentan o pueden presentarse bajo múltiples combinaciones. A pesar de ello existían algunas fórmulas empíricas, recomienda su empleo con «extrema prudencia»,<sup>20</sup> ya que aplicándolas a casos concretos se obtuvo una gran dispersión entre el valor del desagüe real de un puente, reconocido como suficiente después de una larga experiencia, y el calculado por medio de alguna de estas fórmulas, como la de Navier, que permitía obtener el caudal en función la anchura del desagüe, la profundidad aguas arriba, la altura del remanso, un coeficiente de contracción por la presencia de pilas y estribos y la velocidad media de la corriente.

Medio siglo más tarde, a pesar de los continuos avances teóricos y prácticos de la ingeniería civil, los conocimientos hidráulicos de los ríos no habían avanzado gran cosa. El ingeniero Eugenio Ribera<sup>21</sup> refleja esta situación cuando escribe que «en todos los países ocurren hundimientos de puentes. Casi siempre son producidos por violentas crecidas, cuando los desagües son insuficientes. Si las luces del

puente no son bastantes para el desagüe normal de las crecidas, tiene que contraerse su sección». Se remansa entonces el río aguas arriba, produciéndose un salto entre la parte alta del remanso aguas arriba y el nivel de las aguas a la salida del puente, que provoca el aumento de la velocidad de las aguas que puede alcanzar la necesaria para socavar los cimientos. Muestra un cierto desencanto por las formulaciones teóricas de las avenidas, ya que las teorías hidráulicas de la época no eran aplicables en el diseño de los puentes, pues «todas ellas nos parecen algún tanto fantásticas». <sup>22</sup> El estudio y fijación de los niveles de estiaje, crecidas ordinarias y extraordinarias, enmarcaban la decisión si el puente debía «proyectarse para dar paso a las crecidas ordinarias solamente o si ha de ofrecer desagüe bastante para la mayor crecida extraordinaria, por muy excepcional que haya sido». En función de la forma del valle, ya sea de forma triangular / trapezoidal de suelo duro, o uno ancho, Ribera llega a la conclusión que los puentes han de construirse para desaguar las avenidas normales que se producen con cierta periodicidad. Las avenidas extraordinarias no producirán socavación en el primer caso por el aumento de la velocidad al remansarse contra el puente por la dureza del terreno, y en el segundo caso las aguas invadirán amplias llanuras de inundación a ambos lados del puente, que cortarán los caminos, se suspenderá el tránsito y el puente dejará de ser útil, por lo que podrá ser rebasado sin consecuencia ya que las aguas circularán con una baja velocidad por ocupar una amplia sección. Termina Ribera con estas desalentadoras palabras: «Ante tamañas discrepancias de criterio (sobre las fórmulas hidráulicas empíricas aplicables a una determinada ubicación) y la inexactitud de las hipótesis admitidas, considera el autor preferible confiarse al ojo clínico del ingeniero, adquirido por la observación de los puentes inmediatos, si los hubiese, o por la experiencia propia, aplicada a cada emplazamiento». <sup>23</sup>

#### LA CAPACIDAD DE DESAGÜE DE LOS PUENTES ROMANOS

En el apartado anterior se ha analizado brevemente el desarrollo histórico, hasta la mitad del siglo XX, de los conocimientos hidráulicos del río en su vinculación con los puentes que sobre él se construyen. Ve-



mos cómo a medida que progresan otras disciplinas como las matemáticas o la física, se establecieron las primeras formulaciones que intentaban comprender el fenómeno, a pesar de que su simple enunciado teórico resultaba curioso<sup>24</sup> (Gautier siglo XVIII) o de poco valor práctico<sup>25</sup> (Degrand, XIX) y Rivera, XX). Anteriormente a estas fechas los maestros no manejaban muchos conceptos hidráulicos a la hora de construir un puente salvo, como hemos visto, aquella regla compositiva de marcaban los arcos por encima de la mayor avenida.

Si vamos hacia atrás en el tiempo e intentamos saber el nivel de conocimientos teóricos y prácticos de los ingenieros romanos, teniendo en cuenta el retroceso que durante el Medioevo tuvieron las técnicas constructivas en general, no creo que nos equivoquemos mucho si suponemos que tuvieron en su acervo técnico un nivel similar a los renacentistas e incluso a los del siglo XVIII. Entramos, por supuesto, en el campo de la especulación, pero analizando la disposición constructiva y la capacidad de desagüe de algunos puentes que han llegado hasta nosotros, esperamos extraer algunas conclusiones.

No tenemos ninguna duda de que en el diseño y construcción de algunos puentes, como por ejemplo el de Alcántara y el Bibei, fueron determinantes las cuestiones hidráulicas. Estos puentes se pudieron construir con dimensiones más modestas —por parto de menor coste— ya que las cotas de la plataforma no estaban condicionadas por los accesos, pero prefirieron hacerlos con el tamaño adecuado para que por debajo de sus arcos pasasen grandes avenidas. Este condicionante hidráulico fue decisivo pues sin duda ha permitido que ambos tengan un buen estado de conservación y que continúen en servicio. Del puente de Alcántara, Carlos Fernández Casado<sup>26</sup> escribe: «A primera vista parece un puente desproporcionado a las condiciones hidráulicas del río, pero en cuanto se pone en relación con el nivel de máximas avenidas destaca su adecuación funcional».

Los estudios realizados, que exponemos a continuación, sobre el comportamiento hidráulico de las avenidas de algunos ríos *gallaicos* en la zona donde hay o hubo un puente romano, nos va a permitir reforzar nuestra opinión sobre el tema. Veamos en primer lugar las hipótesis de partida:

- El caudal de la avenida de cálculo es la  $Q_{500}$ , es decir la que tiene un período de retorno de 500

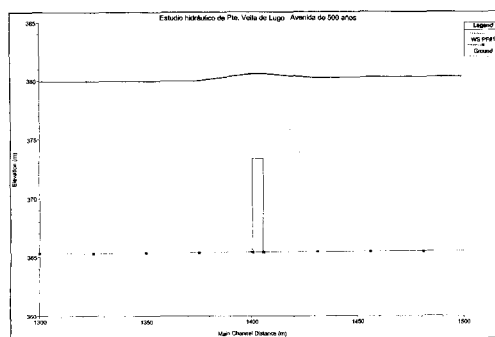


Figura 10  
Ponte Vella de Lugo

años o en otras palabras, la que tiene la probabilidad 1/500 —un 0,2 %— de que el caudal máximo real del río sea superior al del cálculo.

- La cuenca se ha dibujado en una cartografía a escalas 1:50.000 y 1:25.000.
- Se ha utilizado un ábaco, incorporado al actual Plan Hidrológico Norte 1 y utilizable en esta zona de España, que permite obtener el caudal unitario en  $m^3/seg./km^2$  a partir de la superficie de la cuenca y del período de retorno elegido. Sabemos que los valores obtenidos son relativamente altos a los que resultan de la aplicación de otros métodos, pero para los fines perseguidos los hemos considerado válidos.
- Para el estudio del comportamiento hidráulico se ha utilizado el programa informático HEC-RAS, diseñado por la Administración Norteamericana, de amplia difusión en las escuelas técnicas y en la actividad profesional. Introduciendo la forma del cauce por medio de las oportunas secciones transversales aguas arriba y aguas abajo del puente, las condiciones de control y el caudal de avenida, permite obtener, entre otros resultados, los perfiles longitudinales y transversales de la lámina superior de la crecida considerada.

Los ríos y puentes romanos de *Gallaecia* analizados son los siguientes:

1. **Ponte de Chaves** perteneciente a la vía nº 17 del Itinerario de Antonino construido sobre el río Támega en las proximidades de la ciudad portuguesa de Chaves, antigua *Aquae Flaviae*.

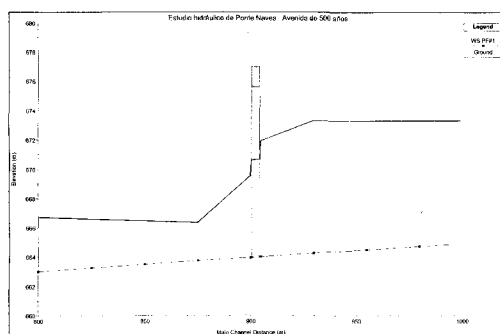


Figura 11  
Ponte Navea

2. **Ponte do Arquinho** que pertenecía a la misma vía nº 17, construido sobre el río Calvo en las proximidades de la ciudad portuguesa de Valpaços.
3. **Ponte de Pedra** también en la vía nº 17 de Braga a Astorga, sobre el río Tuela, cerca de la ciudad de Torre de Dona Chama en el norte de Portugal.
4. **Ponte de San Miguel** pertenecía *Via Nova*, nº 18 del Itinerario de Antonino, construido sobre el río Homen en el Gerês-Portugal, cerca de la actual frontera hispano-portuguesa de A Portela do Home.
5. **Ponte Pedriña** en la misma la vía nº 18, sobre el río Limia, en el sur de la provincia de Ourense, actualmente sumergido en las aguas del embalse de As Conchas.
6. **Ponte Freixo** que daba paso sobre el río Arnoia a una vía que unía Bracara (Braga) con Lucus (Lugo), entre los municipios de Celanova y Cartelle (Ourense).
7. **Ponte Romana de Lugo** perteneciente a la vía nº 19 del Itinerario de Antonino erigido sobre el río Miño en las proximidades de la ciudad de Lugo, antigua *Lucus Augusti*.
8. **Ponte Navea** de la *Via Nova*, sobre el río Navea, entre los municipios ourensanos de Póboa de Trives. Para su estudio hemos tomado una reciente reconstrucción realizada por el ingeniero Segundo Alvarado.<sup>27</sup>
9. **Ponte Bibeí** que también pertenecía a la *Via Nova*, construida sobre el río Bibeí, en las proximidades de Póboa de Trives (Ourense).
10. **Ponte de A Cigarrosa** en la *Via Nova*, vía nº 18 del Itinerario de Antonino, sobre el río Sil en las

proximidades de la villa ourensana de A Rua. Se ha utilizado la reconstrucción realizada por S. Alvarado.

11. El puente de **A Pontóriga** también llamado «Os Pontós», pertenecía a una posible vía secundaria del entorno del complejo minero de As Médulas (León), sobre el río Sil cerca del pueblo de Sobradelo (Ourense). También se ha empleado la reconstrucción hipotética realizada por S. Alvarado.<sup>28</sup>

De los estudios realizados se desprende que muy pocos puentes fueron diseñados para que pasen grandes avenidas, como la considerada, pues solo en tres de ellos, los Navea, de S. Miguel, Navea y Bibeí, es posible. De éstos se debe destacar que fueron construidos en una zona donde los valles tienen una forma similar en V, son estrechos con márgenes muy pendientes, y sobre ríos torrenciales cuyas aguas proceden en determinadas épocas del deshielo: El río Homen recoge en su cuenca los posibles deshielos de A Serra do Gerês-Xurés, mientras que el Navea y el Bibeí los recogen de A Serra de Cabeza de Manzaneda.

En el resto de los puentes el agua de la avenida pasa por encima que, según el caso, ha ocasionado daños o no, como vamos a ver:

- La avenida estudiada de los ríos Támega y Tuela rebasa los puentes de Chaves y de Pedra respectivamente, pero debido a que discurre por zonas de valle amplio, sobre todo el Támega a su paso por Chaves, la velocidad que llevan sus aguas es pequeña, en torno a los 2-3 m/seg. Estas pequeñas velocidades son favorables para que, a pesar de que el puente sea rebasado, los daños sean pequeños, ya que la presión que ejerce la corriente en un cuerpo sumergido es directamente proporcional a un coeficiente de forma (variable con ella, pequeño cuando tiene un perfil hidrodinámico como los tajamares), a la superficie que opone a la corriente y al cuadrado de la velocidad; es decir, si velocidad se incrementa al doble, la presión es cuatro veces mayor. La presión es independiente de la profundidad a la que se halla el objeto. Según esto es muy importante para la durabilidad de un puente que las aguas discurren mansamente en todo momento y que sus elementos opongan la menor superficie posible al paso de la corriente.

Estos dos puentes conservan una buena parte de su fábrica original, sobre todo la parte o cuerpo abovedado, no así los estribos y los pretiles, que como elementos que ofrecen mucha superficie a la corriente, debieron arruinarse en algún momento ya que los actuales no son los originales. Tampoco son romanos los tajamares de ambos puentes, pues son partes sometidas a fuertes impactos producidos por los objetos o árboles arrastrados por las crecidas.

- Un puente que reúne circunstancias parecidas en cuanto a la forma del valle y a la velocidad de la crecida (2,2 m/seg.), pero que apenas conserva restos de su fábrica romana es el Ponte Vello de Lugo. ¿Qué sucedió en este caso?. El análisis del comportamiento hidráulico del río Miño en ese punto apunta a que el volumen de agua de la avenida es muy grande y que alcanza una cota bastante elevada sobre la plataforma del puente romano, unos 5,40 m., aunque esta circunstancia no implica una mayor presión de la corriente pues es independiente de la profundidad. Lo más probable es que otros factores como la insuficiencia del desagüe, la gran superficie que opuso a las avenidas, la socavación de las pilas o la rotura de bóvedas sean la causa de que el puente actual apenas conserve restos de la obra romana.
- Se ha estudiado la avenida de 500 años del río Sil a su paso por dos puentes romanos, el de A Cigarrosa y A Pontóriga, y lo primero que observamos es que ambos son rebasados por la crecida, a una velocidad muy elevada, entre 7 y 11 m/s., que evidentemente supondría un gran poder de destrucción por la conocida vinculación presión-velocidad, confirmado por los pocos restos que se conservan de las obras originales. Del puente de A Cigarrosa quedan unos pocas hiladas de la parte inferior de dos pilas, y de A Pontóriga, puente que tuvo una superestructura de madera apoyada en pilares de piedra, solo se conservan los núcleos de hormigón de cal de las pilas. Es evidente que la posibilidad de ruina en caso de rebosamiento en A Pontóriga, por ser de madera, es mucho mayor que si fuese de piedra.
- El Ponte Pedriña es un puente que es rebasado por la avenida estudiada del río Limia, la cual llevaría en ese lugar una velocidad entre 5 y 6 m/seg., que podría haberle provocado daños graves a lo largo de su existencia. No parece haber-

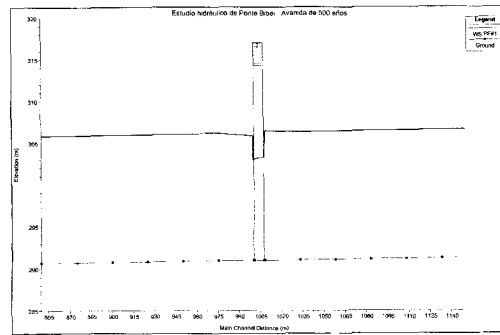


Figura 12  
Ponte Bibei

los sufrido si observamos con detenimiento una foto suya de 1912,<sup>29</sup> pues el estado de conservación de su cuerpo principal parece bastante bueno. Puede que haya resistido la presión de las avenidas gracias a la rigidez que tiene el puente, por su disposición constructiva y su trabazón — características tan alabadas por el P. Pontones — con un arco rebajado poco esbelto, un pequeño desagüero a su lado izquierdo y una gran pila maciza entemedía, de 7,40 m. de anchura, que le haría muy resistente a la fuerza destructiva del río, a pesar de la gran superficie opuesta a la corriente.

- Y finalmente dos puentes en los que los daños experimentados han sido, casi exclusivamente, la destrucción de los muros de acompañamiento de los estribos, mientras que el resto del puente, los estribos, las bóvedas y las pilas, bien trabadas por su aparejo, resistían tenazmente. La existencia actual de fábricas de mampostería de baja calidad, fruto de malas reconstrucciones, en los estribos del Ponte do Arquinho y antes de su restauración en los del Ponte Freixo, así parecen indicarlo. La ruina de estos muros de acompañamiento o manguardias, se debió a la gran superficie que oponían a la corriente durante las crecidas, posiblemente también a su peor calidad constructiva que el resto del puente — esta posibilidad la hemos apreciado en ambos puentes — y a la velocidad del agua que, a pesar de no ser muy alta, del orden de 2-3 m/s. en el Ponte do Arquinho y de 3 a 5 m/s. en Freixo, fue suficiente para derribarlos.

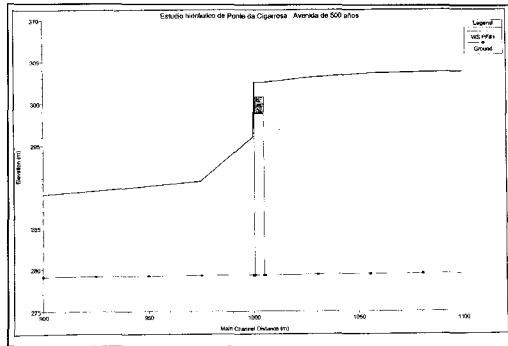


Figura 13  
Ponte de Cigarrosa

### CONCLUSIONES

Como colofón de lo hasta aquí expuesto, opinamos que los constructores de puentes en época romana disponían de amplios conocimientos, similares a lo que se tenían en el siglo XVIII, que realizaban planteamientos previos de carácter hidráulico y que entre sus datos previos estaban las cotas de las avenidas de las que había recuerdo. Es evidente que en algunos casos el condicionante hidráulico tuvo relevancia y fue decisivo en su construcción y en otros no, al sacrificarlo en aras de la economía y la racionalidad a las que eran tan dados los romanos.

El espesor de las pilas y la opacidad de los tímpanos debió ser una preocupación para los ingenieros romanos, ya que eran los elementos que estrechaban el cauce. En cuanto la primera de estas cuestiones determinadas proporciones respecto a la luz de los arcos (entre  $1/2$  y  $1/5$ ) conocidas entre ellos fueron la base teórica para su diseño. Para aminorar sus efectos y facilitar el desagüe dotaron de tajamares los frentes de las pilas, generalmente apuntados de sección triangular y en menor medida de forma redondeada. En cambio no construyeron espolones o contratajamares en su paramento aguas abajo que lo dejaron plano, claramente mal adaptados a las condiciones hidráulicas a las que se halla sometida esa zona. En cuanto a la opacidad de los tímpanos, elementos que ofrecen mucha resistencia al agua, la trataron de aminorar dotándolos de desagüederos abovedados de pequeña luz que atravesaban su masa, desde épocas muy tempranas (siglo I a.C.) como se

aprecia en los puentes republicanos de Roma, Ponte Cestio y Ponte Fabricio.

No tuvieron los conocimientos necesarios para darle a todos los puentes una capacidad suficiente, aunque en algunos tuvieron la suficiente sagacidad para conseguirlo, como en el puente de Alcántara y en los puentes *gallaicos* de San Miguel —volado por las tropas portuguesas en 1640 durante la guerra hispano-lusitana— y Bibei. Con otros ríos fracasaron estrepitosamente ya que no se conserva ningún puente, quizá debido a que son ríos torrenciales cuyos caudales de avenidas, en determinadas épocas, alcanzan valores muy altos y de una forma muy rápida. En España estos ríos pertenecen a la cuenca mediterránea y cantábrica, donde se produce de vez en cuando el fenómeno meteorológico de la gota fría, que origina grandes e imprevisibles avenidas. Los ríos de la vertiente atlántica, de regímenes menos variables y que discurren por zonas en donde no se producen esos fenómenos meteorológicos, parece que las controlaron mejor, como lo demuestra el hecho de la totalidad de los puentes peninsulares conservados están contruidos sobre ellos.

Desde el punto de vista de diseño disponían de reglas prácticas geométricas y proporcionales, similares a las que hubo hasta finales del siglo XIX y comienzos del XX, que aplicaban al diseño de los puentes y que ajustaban según fuese el río, la forma del valle, las condiciones de cimentación, los materiales a emplear, etc. Es muy probable que tuviesen algún tipo de normas o directrices generales, más o menos oficiales, que les obligaban a cumplir determinados requisitos, como era dotarlos de una anchu-

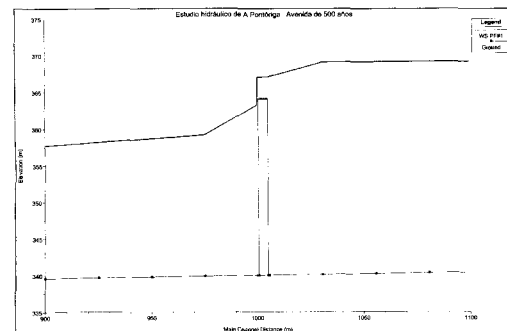


Figura 14  
Ponte de A Pontóriga

ra mínima, la utilización del un tipo de *opus* normalmente *quadratum con almohadillado*, o ejecutar las fábricas con hiladas alternas de sillares a sogá y a tizón. Nos parece una cuestión clara, confirmada por los resultados estadísticos obtenidos a partir de muestras de suficiente extensión, y en los que se observan unas probabilidades muy altas, al analizar la presencia de ciertas medidas, proporciones o características constructivas.

#### NOTAS

1. Vitrubio Polion, M.: *Los diez libros de Arquitectura*. Edición de José Ortiz y Sanz. Reed. facsímil Edic. Akal. Madrid, 1992.
2. Frontino: *Les acueducs de la Ville de Roma*. Trad. de Pierre Grimal. Société d'Édition «Les Belles Lettres». París, 1961.
3. Plinio Segundo, C.: *Historia Natural*. Traducida y anotada por el doctor Francisco Hernández. Reed. Visor Libros-Univ. México. Madrid, 1998.
4. Alvarado, S.; Durán, M.; Nárdiz, C.: *Puentes históricos de Galicia*. Xunta de Galicia-Colegio de Ingenieros de Caminos. Santiago, 1989.
5. Mesqui, J.: *Le pont en France avant le temps des ingénieurs*. Picard. París, 1986.
6. Bois, G.: *La revolución del año mil*. Editorial Crítica. Barcelona, 1991.
7. Mesqui, J.: *Op. cit.*, p. 162.
8. Bechmann, R.: *Villard de Honnecourt. La pensée technique au XIII<sup>e</sup> siècle et sa communication*. Picard. París, 1991.
9. Alberti, L. B.: *De Re Aedificatoria*. Ediciones Akal. Madrid, 1991.
10. *Ut supra*, pp. 191 y 184 y ss.
11. Pseudo-Juanelo Turriano: *Los veintiún libros de los ingenios y las máquinas*. Tomo I y II. Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos-Ediciones Turner. Madrid, 1983.
12. Frago, J. A.; García-Diego, J. A.: *Un autor aragonés para los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas*. Diputación General de Aragón. Zaragoza, 1988.
13. Gille, B.: *Les ingénieurs de la Renaissance*. Edit. Hermann. Tours, 1962.
14. Mesqui, J.: *Op. cit.*, p. 172.
15. Gautier, H.: *Traité des ponts*. C. André Cailleau. París, 1716.
16. *Ut supra*, p. 34.
17. León Tello, F.; Sanz Sanz, M<sup>a</sup> V.: *Estética y teoría de la arquitectura en los tratados españoles del siglo XVIII*. Consejo S. de Investigaciones Científicas. Madrid, 1994.
18. *Ut supra*, pp. 1189 y ss.
19. Degrand, M. E.: *Ponts en maçonnerie*. París, 1888.
20. *Ut supra*, p. 428.
21. Ribera, J. E.: *Puentes de fábrica y hormigón armado*. Tomo III. Gráficas Barragán. Madrid, 1936.
22. *Ut supra*, p. 17.
23. *Ut supra*, p. 66.
24. Gautier: *op. cit.*
25. Degrand: *op. cit.*; Rivera: *op. cit.*
26. Fernández Casado, C.: *Historia del puente en España. Puentes romanos*. Instituto Eduardo Torroja. Madrid, 1960.
27. Alvarado Blanco, S.: «El puente romano-medieval de A Cigarrosa (Ourense). Una interpretación constructiva». *Boletín Auriense*, año XXV. Ourense, 1995.
28. Alvarado Blanco, S.: «A Pontóriga. Sobre los restos de un antiguo puente romano cerca de Sobradelo de Valdeorras». *Boletín Auriense*, año IX. Ourense, 1979.
29. Alvarado Blanco, S.: «El puente romano-medieval... *op. cit.*, p. 105.