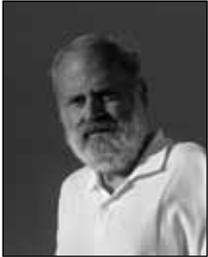


El puente, obra de ingenieros (I)

Los puentes del primer periodo y sus constructores. Puentes de piedra y de madera



Leonardo Fernández Troyano

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director de CFCSL

Resumen

En toda historia parcial de una actividad humana siempre ha habido hechos y personas que han sido fundamentales en ella; en la historia de la ingeniería; y en particular en la de los puentes también ha sido importante la evolución debida a los muchos ingenieros que han proyectado y construido puentes. El primer periodo de la historia de los puentes, el de los de piedra y los de madera terminó a finales del siglo XVIII con el primer puente metálico. En él la construcción de puentes está incluida en el arte de construir, que incluye ingeniería y arquitectura.

Palabras clave

Puentes, viaductos, arcos, tableros, ingenieros

Abstract

Throughout the history of all human activity there have been events and people that have changed the course of these activities. In the history of engineering and in the history of bridges in particular, evolution has similarly played a very important part on account of the many engineers that have designed and built bridges. The first period in the history of bridges, that of stone and wooden bridges, concluded at the end of the 18th century on the advent of the first iron bridge. In this, the construction of bridges becomes part of the art of building, incorporating both engineering and architecture.

Keywords

Bridges, viaducts, archs, decks, engineers

1. Introducción

Son innumerables los constructores de puentes que a lo largo de la Historia han contribuido a su evolución y desarrollo hasta llegar a los puentes actuales. En los constructores incluimos a todos los que contribuyen a que un puente se haga realidad, desde los autores del proyecto hasta los que hacen la obra con sus propias manos. El puente es obra de todos ellos.

En toda historia parcial de una actividad humana siempre ha habido hechos y personas que en determinados momentos han dado impulsos fundamentales a esa historia. Stefan Zweig en el prólogo de su libro “Momentos estelares de la humanidad” dice lo siguiente: “Paralelamente a lo que acontece en el mundo del arte en que un genio perdura a través de los tiempos, en la Historia un momento determinado marca el rumbo de siglos y siglos”. El libro de Isaac Asimov, cuyo título en castellano es “Momentos estelares de la Ciencia”, trata de los grandes científicos que han sido decisivos en la evolución y desarrollo del conocimiento de las distintas ciencias. Más que con los Momentos estelares de la Ciencia, nos encontramos en este

libro ante los hombres estelares de la Ciencia. Pero si bien es verdad que hay hechos y personas fundamentales en cualquier historia, en la ingeniería también es fundamental el desarrollo que se produce gracias a las aportaciones menores de muchos ingenieros, que al ejercer su profesión la van mejorando. La ingeniería en general y la de puentes en particular, adquiere todo su valor cuando se hace universal. Una obra aislada puede tener un valor en sí misma, pero su valor ingenieril alcanza su plenitud cuando la solución se universaliza.

La historia del puente se puede dividir en dos periodos: el periodo de los puentes de piedra y madera que ocupa la mayor parte de la historia, y el de los puentes metálicos y de hormigón, es decir, de los puentes modernos, que se inició a finales del siglo XVIII y se desarrolló en el XIX.

Además de la diferencia entre los dos periodos caracterizada por los materiales, también es importante el cambio en sus constructores. Si en el primer periodo se incluye la construcción de puentes en los tratados de arquitectura, es en el siglo XVIII

cuando ambas profesiones se separan, y si bien hoy en día está clara la idea de que el puente es obra de ingenieros, aunque en su proyecto y construcción puedan intervenir otros profesionales, esto no ha sido así durante la mayor parte de la historia.

Arquitectura e ingeniería son dos profesiones diferentes pero proceden de un cuerpo común que era la arquitectura según la definía Vitrubio o los tratadistas del Renacimiento. Se trata, en realidad, del arte de construir. El tratado de arquitectura de Vitrubio incluye todas las actividades del ingeniero civil actual, el ingeniero de Caminos, Canales y Puertos español. En este tratado, se describen puentes, caminos, obras hidráulicas, y puertos. También se incluyen máquinas y las actividades de los ingenieros militares.

La separación entre ambas profesiones se inició poco antes del paso de un periodo a otro de los puentes. Primero, se crearon los cuerpos de ingenieros, y poco después las escuelas de ingeniería con orientaciones diferentes a las escuelas de arquitectura. Esta separación ha dado lugar a una relación compleja entre ambas profesiones, con polémicas de todo tipo, pero que en multitud de ocasiones están condenadas a colaborar.

A pesar de ese cuerpo común de la ingeniería y arquitectura que se refleja en los tratados, desde los griegos existen arquitectos e ingenieros diferenciados profesionalmente aunque con frecuencia las dos actividades, ingeniería y arquitectura las

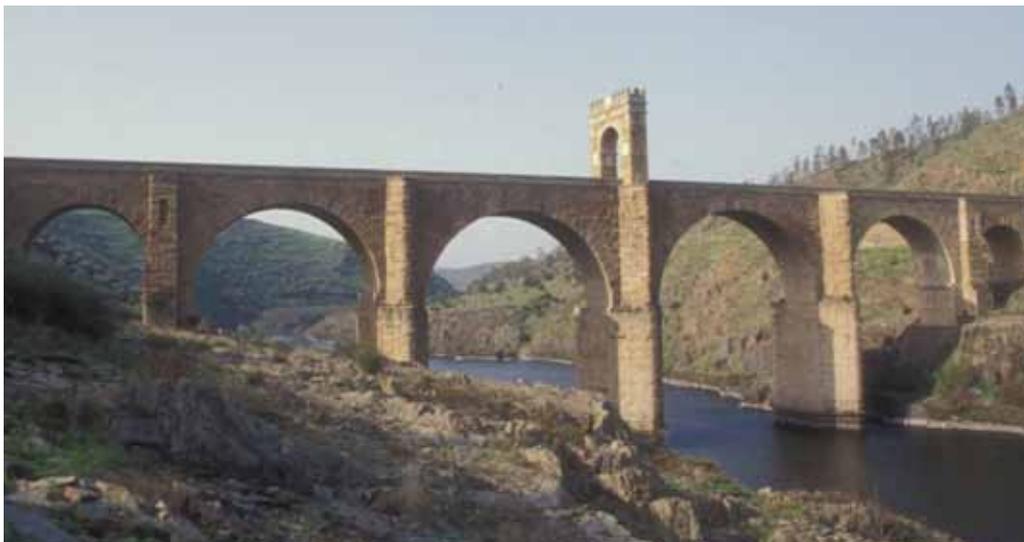
ejercían las mismas personas: Arquímedes, el gran sabio de Magna Grecia, se puede considerar básicamente un ingeniero, debido a sus inventos de mecanismos y a sus máquinas de guerra, además de sus aportaciones a las matemáticas y a la física.

2. Los puentes romanos

Si bien se han hecho puentes de diversos tipos desde la prehistoria, se puede decir que su historia se inició con los romanos, tanto de los de piedra como de los de madera. Durante el Imperio Romano se llegó a tal grado de perfección en su proyecto y construcción que no se puede hablar de una superación hasta el siglo XVIII.

Pocos constructores de puentes de la época romana han pasado a la historia con su nombre. Entre ellos destacamos a Cayo Julio Lacer y a Apolodoro de Damasco, autores de dos puentes excepcionales en la historia, ya citados: el puente de Alcántara sobre el río Tajo y el puente sobre el Danubio, en Orsovo.

El puente de Alcántara es una obra excepcional en la historia del puente y, por ello, en cierta medida, se puede considerar que es intemporal. Tiene muchas características de los puentes romanos pero no es comparable a ninguno de ellos. Esta excepcionalidad le da el carácter de obra aislada porque no es una solución que se universalice con los romanos ni en las épocas posteriores. Ningún otro ingeniero romano, medieval, o renacentista, se atrevió o tuvo ocasión



**Puente de Alcántara
sobre el río Tajo, en Cáceres**



**Puente de Zhaozhou
en la provincia de
Ebei (China). Siglo VII**

de plantearse un puente de envergadura análoga. Hay que llegar a los viaductos ferroviarios de piedra del siglo XIX y principios del XX, para encontrar obras comparables al puente de Alcántara.

El puente de Alcántara parece más un viaducto que un puente “sensu estricto”, es decir, parece que su dimensión trasciende la del río y que su rasante viene definida por la rasante de la vía, porque nadie, sin un conocimiento de las avenidas del río en ese lugar, puede suponer que la lámina de agua puede subir del orden de 30 metros desde su nivel normal, como ha ocurrido en varias ocasiones. Está claro que Lacer conocía este nivel máximo cuando proyectó el puente y ello le obligó a enfrentarse con problemas difíciles de ingeniería no conocidos hasta entonces.

Los 47 metros de altura no le permitieron superponer dos puentes como se había hecho en los acueductos de gran altura como el Pont de Gard, porque la reducción de la sección hidráulica lo hacían inviable. Fue necesario hacer pilas esbeltas y arcos de gran luz. El arco mayor de los romanos, el puente de San Martín en el Valle de Aosta, tiene 35,5 metros de luz, y el mayor de los del puente de Alcántara 28,8 metros, situados sobre pilas de gran altura.

Está claro que Cayo Julio Lacer se enfrentó a difíciles problemas de ingeniería y los resolvió magistralmente. Es por ello una obra de ingeniería, pero también es cierto que sus dimensiones y características hacen de él una de las obras más monumentales de la ingeniería de todos los tiempos.

No es Alcántara el único puente excepcional que se ha quedado fuera de su tiempo. Otro ejemplo que podemos citar con esa cualidad es el puente de Zhaozhou en la provincia de Ebei en China, construido en el siglo VII. Es un arco rebajado de 37 metros de luz, con un rebajamiento de 1/5, que no se generaliza en los puentes arco hasta que se hacen de hormigón. Otra singularidad es que los arquillos de aligeramiento disocian el arco del tablero, solución que tampoco se generaliza hasta los puentes de hormigón. Igual que en el puente de Alcántara, conocemos su autor Li Chun, que construyó otro puente análogo con una luz de 20 metros. Los chinos siguieron haciendo puentes de piedra magníficos, incluso hasta mediados del siglo XX, pero los puentes de Li Chun son obras aisladas, cuya solución no se universalizó hasta los primeros puentes de hormigón armado de finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

Pocos puentes se construyeron en los grandes ríos europeos hasta el siglo XIX. Los romanos hicieron dos, el puente sobre el Danubio en Orsovo de Apolodoro de Damasco, y el puente sobre el Rin de Julio Cesar, un puente de madera cuyas pilas eran maderos hincados en el lecho del río. Se construyó en diez días, y a los dieciocho de su construcción Cesar mandó derribarlo para que no pudieran usarlo sus enemigos.

El puente sobre el Danubio en Rumanía es también una obra excepcional. Tenía 21 arcos de madera con luces comprendidas entre 35 y 38 metros, y grandes pilas de piedra, del orden de 15 metros de anchura, de las que todavía se conservan restos. Tenía una longitud total de más de un kilómetro. Cimentar un



Bajorrelieve del puente de Osovo sobre el Danubio en la columna trajana. Roma. Apolodoro de Damasco

puente en un río de la profundidad y la corriente del Danubio en Orsovo, no es fácil ni en los tiempos actuales. De los arcos se conserva documentación gráfica en la Columna Trajana que hizo el mismo Apolodoro, y también en monedas del imperio de Trajano y posteriores. Los arcos estaban formados por anillos de madera concéntricos unidos por travesaños radiales.

También se atribuye a Apolodoro de Damasco el puente de piedra de Alconetar sobre el río Tajo del que solo se conservan unos arcos rebajados, dos de ellos romanos, y varias pilas también romanas. Los restos del puente de Alconetar se trasladaron de lugar para evitar que quedaran sumergidos en el pantano de Alcántara.

3. La Edad Media

Durante la Edad Media, la Iglesia intervino con frecuencia en la construcción de los puentes, de la misma forma que intervino en casi todas las actividades de ese período; a causa de esa intervención frecuente se creó el mito de los monjes pontífices, organizaciones religiosas que se dedicaban a construir puentes en todo el mundo cristiano. Pero estas organizaciones nunca existieron sino que hubo monjes aislados dedicados a construir puentes que, en algunos casos crearon cofradías religiosas o laicas para construir un determinado puente, pero que nunca se convirtieron en organizaciones permanentes.

Uno de los monjes constructores de puentes más conocido fue el francés San Benezet que construyó en el siglo XII un puente de madera con pilas de piedra sobre el Ródano en Aviñón. El puente actual de Aviñón del que se conservan cuatro arcos

escarzos de 34 metros de luz, llamado de San Benezet, se construyó en el siglo XIV para sustituir el de madera.

En España, en el siglo XI, Santo Domingo de la Calzada dedicó su vida al camino de Santiago, construyendo hospederías y hospitales para peregrinos, haciendo caminos y puentes, entre ellos el de la ciudad que lleva su nombre sobre el río Oja. Desgraciadamente de los puentes que construyó Santo Domingo no queda ninguno. Su discípulo San Juan de Ortega construyó el puente de Logroño sobre el río Ebro que fue sustituido en el siglo XIX por el hoy llamado puente de piedra de la ciudad.

También en el siglo XI, San Armengol se dedicó a construir caminos y puentes y ello le costó la vida porque se ahogó en el río Segre al caerse desde un andamio del Pont de Bar donde se encontraba trabajando con sus propias manos. De su principal obra, el camino del Segre se han perdido los puentes; se conservan únicamente los arcos adosados a la roca para pasar por algunos desfiladeros.

El viejo London Bridge, uno de los puentes más famosos del mundo, también fue construido por un monje, Peter de Colechurch en el siglo XII. Una construcción cargada de dificultades por las condiciones de cimentación y la profundidad del río.

Hubo también muchos maestros y constructores de puentes medievales que no pertenecían a la Iglesia, pero de pocos se conoce su nombre.



**Puente sobre el Ródano,
en Aviñón**

4. El Renacimiento

Los dos tratados de arquitectura del Renacimiento más conocidos son probablemente el de Alberti “De Re aedificatoria”, del siglo XV, y el de Andrea Palladio “Los cuatro libros de Arquitectura”, del siglo XVI. Son, igual que el de Vitrubio, y probablemente influidos por él, tratados del arte de construir, es decir, que tratan temas que hoy son de ingeniería de arquitectura. En ellos se tratan todo tipo de Obras Públicas, desde puentes y caminos hasta alcantarillas y puertos. Por ello, es difícil en este período identificar a los ingenieros y a los arquitectos. Los diferentes profesionales dedicados al arte de construir tenían diversas procedencias: los que estudiaban en universidades, los que aprendían con otro arquitecto o ingeniero, o los que procedían de maestros canteros.

Los planteamientos y dibujos de Andrea Palladio de puentes de piedra y madera tuvieron gran trascendencia en el Renacimiento. Construyó varios puentes de madera y realizó una serie de dibujos de vigas y arcos triangulados con una intuición bastante clara de su comportamiento resistente. El más conocido de sus puentes de madera es el de Bassano sobre el río Brenta, con vanos de 11 metros de luz. Se ha destruido y reconstruido en varias ocasiones. También se debe a Palladio la composición de puentes de piedra basada en el puente romano de Augusto en Rímíni, que se utilizó con frecuencia en el Renacimiento a partir de sus dibujos.

El primer intento de crear una escuela de ingeniería en España la promovió Felipe II en Madrid, la Real Academia

Matemática, y encargó el plan de estudios a Juan de Herrera, arquitecto real, que tenía una buena formación técnica; fue autor de las máquinas que se utilizaron en la construcción del Monasterio del Escorial. De Juan de Herrera son dos de los puentes de piedra más perfectos de nuestro país, el puente de Segovia sobre el río Manzanares, donde rectificó la rasante del proyecto inicial de Gaspar de la Vega, dejándola horizontal; y el puente de Torrelodones sobre el río Guadarrama, con un solo arco de dos roscas, una de las mejores composiciones de los arcos de piedra españoles.

Uno de los puentes más conocidos del Renacimiento es el de Rialto sobre el Gran Canal de Venecia, construido por el arquitecto Antonio Da Ponte, con un arco rebajado de 27,50 metros de luz y con un perfil en lomo de asno muy acusado, como todos los puentes de Venecia, porque las orillas están casi a la altura del agua, y los arcos requieren elevarse para conseguir suficiente flecha, y dejar paso a las embarcaciones. Otro clásico del siglo XVI es el de Santa Trinidad sobre el río Arno en Florencia, construido por el arquitecto Bartolomeo Ammanati con tres arcos carpaneles ligeramente apuntados en clave, y una luz máxima de 29 metros.

Otro de los puentes más conocidos del siglo XVI es el de Mostar sobre el río Neretva en Bosnia, del que también se conoce su autor, Majrudin, arquitecto del sultán. Es un arco de 30 metros de luz que se destruyó en 1993 durante la guerra entre las diferentes regiones de la antigua Yugoslavia.



Puente de Segovia sobre el río Manzanares, en Madrid



Puente Rialto sobre el Gran Canal de Venecia

5. Los siglos XVII y XVIII

Puentes en París sobre el Sena se construyeron desde la Edad Media, pero los más antiguos que se conservan son del siglo XVII. El primero de ellos es el paradójicamente llamado Pont Neuf, que se terminó en 1607, obra del arquitecto Androuet de Cerceau.

Uno de los puentes del siglo XVII más conocido de esta ciudad es el Pont Royal, construido a finales del siglo XVII con proyecto del ingeniero Jules Hardouin-Mansart y construido por Jacques IV Gabriel, arquitecto del rey. Tiene cinco arcos carpaneles con 23,5 metros de luz, el central con un suave lomo de asno. Este puente, sobrio y bien compuesto, sirvió de modelo para gran parte de los puentes franceses del siglo XVII y del XVIII.

Como vemos, la mayoría de los puentes del Renacimiento son obra de arquitectos porque ambas profesiones estaban unidas. Esta situación se mantuvo en Europa durante el siglo XVII y parte del XVIII, porque a principios de este siglo, se produjo en Francia la primera separación de las dos profesiones, ingeniería y arquitectura, al crearse el cuerpo de ingenieros de Ponts et Chaussées (puentes y calzadas), como subdivisión del cuerpo de arquitectos del rey. El Pont Gabriel de Blois sobre el Loira, un magnífico puente, se puede considerar el brillante principio de la llamada era de los ingenieros. Tiene 11 arcos carpaneles con luces decrecientes del centro a los extremos con un lomo de asno bastante acusado. La luz máxima es de 26 metros. Fue construido por Jacques V Gabriel, el primero de los “premiers Ingenieurs” del cuerpo de Ponts et Chaussées.

En 1747 se fundó en París la Escuela de Ingenieros de Ponts et Chaussées. Su primer director fue el ingeniero francés nacido en Ginebra, Jean Rodolphe Perronet cuya importancia en la historia de la ingeniería no solo es debida a su labor como fundador de la primera escuela de ingeniería del mundo, sino también por haber sido un innovador en la construcción de los puentes de piedra. Se puede considerar a Perronet el primer ingeniero moderno con mentalidad análoga a la de los ingenieros de los siglos XIX y XX, no solo por sus obras, sino por sus aportaciones teóricas al cálculo de los arcos. La mayor transformación que se ha producido en los puentes de piedra, desde los romanos hasta nuestros días, fue la que introdujo Perronet. En primer lugar, disminuyó el ancho de las pilas desde $1/5$ de la luz del arco, que tenían las más esbeltas, a $1/10$, es decir, a la mitad. Para ello, era necesario que los empujes de cada arco se compensaran con los contiguos, lo que obligaba a construir todos a la vez, y lo que era más difícil, a descimbrarlos simultáneamente. La operación de descimbrado se llegó a convertir en un espectáculo. A la del puente de Neuilly asistió el rey Luis XV. En segundo lugar, aumentó considerablemente el rebajamiento de los arcos, llegando en el puente de Nemours a $1/15$ de la luz, valor difícilmente superable en puentes de piedra. Parece más una viga continua de canto variable que un puente de arcos múltiples.

Hay en toda la obra de Perronet, y en sus escritos, una preocupación por los valores expresivos y formales de sus puentes. Muchas de sus innovaciones son debidas a una



Pont Royal. S. XVII. J. Hardouin-Mansart, Jacques IV Gabriel



Pont Royal. S. XVII. J. Hardouin-Mansart, Jacques IV Gabriel

búsqueda de la belleza del puente, antes que a un desarrollo técnico. Los puentes de Perronet crearon escuela, y no solo en Francia, sino en todos los países de Europa. En España, la inmensa mayoría de los puentes de piedra del siglo XIX e incluso del XX son del tipo creado por Perronet: arcos escarzanos disociados de las pilas que están formadas por tabiques estrechos.

Perronet consideraba que de las obras anteriores a las suyas era imposible obtener ningún conocimiento útil, planteamiento que revela con bastante claridad la forma de pensar de muchos de los nuevos ingenieros. Este planteamiento de Perronet nos parece excesivamente radical; incluso hoy en día, de los puentes de piedra se puede aprender composición y formas. Carlos Fernández Casado, profesor de puentes de la Escuela de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Madrid, decía lo contrario: que nadie proyecte puentes en España sin haber pasado por Alcántara.

En España, el primer cuerpo de ingenieros que se creó fue el de los ingenieros militares en 1711, durante el reinado de Felipe V. Su actividad no se limitó únicamente al campo militar, sino que intervinieron también en las obras públicas, tanto en caminos, como en canales, abastecimientos de agua y puertos, actividades en las que siguieron interviniendo hasta que se creó el cuerpo de Ingenieros de Caminos y Canales. Pero la intervención de los ingenieros militares en las obras públicas no excluyó a los arquitectos, que siguieron haciendo la mayoría de las carreteras y puentes en el siglo XVIII. Juan de Villanueva, arquitecto del Museo del Prado, construyó la carretera de

Villalba a Segovia a principios del siglo XIX. Pedro de Ribera, arquitecto de la ermita de San Antonio de la Florida, es también el autor del puente de Toledo sobre el río Manzanares en Madrid, uno de los mejores puentes barrocos de la historia. El arquitecto Marcos de Vierma construyó carreteras y puentes, entre ellos el puente largo de Aranjuez y el puente de Viveros, ambos sobre el río Jarama.

La creación del cuerpo de ingenieros de Caminos y Canales en España fue análoga a la francesa, e inspirada en ella, pero con medio siglo de retraso. El hombre clave de este proceso fue el ingeniero de origen canario Agustín de Betancourt, que se formó en la escuela de Ponts et Chaussées francesa. Su informe sobre el estado de los caminos y canales en España es muy crítico con los arquitectos, en particular con la deficiente construcción de los puentes “La total ignorancia de los arquitectos en este género de obras, por no tener ni idea de los principios de la hidráulica, es causa de este lastimoso mal”. En 1803 se creó la Escuela de Caminos y Canales cuyo fundador y primer director fue Betancourt, que definió en España la profesión de ingeniero. La enseñanza en ella se basaba casi exclusivamente en una formación científico-técnica, lo que le dio un carácter innovador y progresista que trascendió a la sociedad y, por ello, la Escuela de Caminos y Canales se consideraba como un centro de ideología constitucional y liberal, con el significado que tenía entonces la palabra liberal, lo que provocó su cierre en más de una ocasión por motivos políticos así como el exilio de sus miembros más notables, entre ellos su fundador Betancourt, que terminó sus días exiliado en Rusia donde dejó una gran parte de su labor. **ROP**