

Arquitectos e Ingenieros. Historia de una relación

Architects and Engineers. The history of a relation

Leonardo Fernández Troyano. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Carlos Fernández Casado S.L. cfcsl@cfcsl.com

Resumen: Todo arte precisa de una técnica aunque a veces la técnica que requiere es elemental. Esto es evidente en la arquitectura, porque para construir es necesario conocer las técnicas de la construcción. Arquitectura e ingeniería son profesiones diferentes, pero proceden de un tronco común, que es la arquitectura según la definía Vitrubio, o los tratadistas del Renacimiento. El progreso en el arte de construir que se produjo durante la revolución industrial llevó a la disociación de las dos profesiones. Pero el tronco común de ambas, que es el arte de construir, hace que en muchos casos sean complementarias, y en otros, el límite entre ambas sea difícil de definir. Siempre ha sido y será una relación compleja la del arquitecto y el ingeniero, pero a pesar de la diferencia de mentalidades, la colaboración entre ambas profesiones es un hecho generalizado que va en aumento.

Palabras Clave: Arquitectura, Ingeniería, Historia de la ingeniería, Puentes

Abstract: All art requires technique, even though this technique may sometimes be very elementary. This is evident in architecture as in order to build it is necessary to be aware of building techniques. Architecture and engineering are different professions but come from a common root which is that of architecture as defined by Vitruvius or the Renaissance essayists. The progress in the art of building seen over the industrial revolution has since led to the splitting of both professions. However, the common root of both and, namely, the art of building, makes them complementary in many cases, while in others, the borders between the two are scarcely discernable. There has always been and always will be a complex relation between the architect and the engineer, but in spite of the different mentalities the collaboration between both professions is a common fact and one which can only increase.

Keywords: Architecture, Engineering, Engineering history, Bridges

I. Introducción

Todo arte precisa de una técnica, aunque algunas veces la técnica que requiere es muy elemental. Pero otras veces no lo es tanto; al ver las grandes esculturas de RICHARD SERRA que se expusieron en el Guggenheim de Bilbao, u otras obras suyas, se hace evidente que dar forma y acoplar esas gigantescas chapas requiere una técnica metalúrgica muy desarrollada. Donde más claramente se plantea este problema es en el arte de la arquitectura, porque para construir, siempre es necesario conocer técnicas de la construcción. Las técnicas que utilizará el arquitecto serán más o menos complejas según la clase de obra que vaya a realizar, y dependerá también de la envergadura del edificio; el problema de la escala es fundamental en la arquitectura y en la ingeniería.

Por otro lado, muchas obras de ingeniería tienen posibilidades expresivas para el espectador, y éste así lo percibe. Como ejemplo podemos citar muchos puentes que son para los ciudadanos, símbolos de grandes ciudades, como el puente de **Brooklyn** de Nueva York, o el **Golden Gate** de San Francisco. Por ello, se les puede atribuir un valor artístico, y este valor deberá estar presente en el desarrollo creativo de la obra de ingeniería, desde la planificación, hasta el proyecto y la construcción.

Arquitectura e ingeniería son dos profesiones diferentes, pero proceden de un tronco común, que es la arquitectura según la definía VITRUBIO, o los tratadistas del Renacimiento. Pero como en toda actividad humana, el progreso del conocimiento hace éste cada vez más complejo y obliga a la especialización. El progreso en el arte de construir que se produjo durante la Revolución Industrial,



Fig. 1. Richard Serra, La Materia del Tiempo. Museo Guggenheim. Bilbao. Foto: Erika Barahona Ede.

Fig. 2. Puente de Brooklyn. Nueva York. 1883. J. Roebling. Luz 468 m.



debido a la aparición de nuevos materiales y al origen del conocimiento teórico del comportamiento resistente de las estructuras, llevó a la disociación de las dos profesiones.

Esto no quiere decir que el problema de la estructura resistente aparezca o se potencie con la Revolución Industrial, porque se puede decir que en la arquitectura, la presencia de la estructura resistente ha ido de más a menos. El **Pantheon** de Roma, las bóvedas del románico o del gótico, o las cúpulas del Renacimiento son básicamente expresión de su estructura resistente. Sin embargo no había un conocimiento científico de su comportamiento; fue fundamentalmente un conocimiento empírico el que permitió llegar a obras tan extraordinarias como las romanas, las románicas y las góticas. Hasta el siglo XX, el conocimiento teórico de las estructuras ha ido por detrás de las realizaciones. Sorprende y produce admiración la audacia y capacidad de empresa de algunos ingenieros del siglo XIX que contaban con unos conocimientos teóricos y unos medios de construcción muy inferiores a las obras que hacían.

Esta pertenencia de la arquitectura y la ingeniería a un tronco común, que es el arte de construir, hace que en muchos casos sean complementarias, y en otros, el límite entre ambas sea difícil de definir. Hay obras de arquitectura que no requieren la intervención de un ingeniero, e

igualmente obras de ingeniería que no requieren arquitecto. Sin embargo hay muchas obras donde deben trabajar juntos. No siempre este trabajo en común estará equilibrado, porque la participación de uno y otro estará condicionada por el tipo de obra. En algunos casos el trabajo del ingeniero será secundario respecto del arquitecto y en otros casos será al contrario. Un ingeniero puede proyectar la estructura resistente de un edificio de viviendas de ocho o diez plantas, pero su incidencia en el conjunto de la obra será mínima. Por otro lado un arquitecto puede intervenir en el proyecto de una presa, pero su intervención en el proyecto será secundaria, si bien puede ser importante en su fisonomía final. Esto hace que no sea simétrica la participación del ingeniero en las obras de arquitectura respecto de la del arquitecto en las obras de ingeniería.

La proximidad y complementariedad de ambas profesiones ha dado lugar a roces y polémicas entre ellos, en gran parte por problemas corporativos, es decir, de competencias profesionales, pero también por problemas de identidad de cada profesión. Esta polémica se inició en el siglo XIX con una violencia inusitada; se superó en gran parte a principios del siglo XX, pero hoy en día sigue habiendo conflictos de competencias y de identidad. Como ejemplo de la situación actual de este problema, pode-

Fig. 3. Puente de la Golden Gate. San Francisco. 1937. J.B. Strauss y C. Ellis Ings, J. Ebersson y I.F. Morrow Arqs. Luz 1280 m.

Fig. 4. Pantheon de Roma. a) interior. b) exterior.





mos referirnos a la polémica que se ha producido en los últimos años, por la irrupción de los arquitectos en el campo de los puentes como diseñadores exclusivos, considerando que el fenómeno resistente ha pasado a ser secundario en ellos; el puente se convierte en un objeto de puro diseño; lo mismo da un puente de 20 que de 200 metros de luz; se olvida el factor escala, fundamental en todo fenómeno resistente. Un ejemplo de esta forma de hacer puentes, ha sido el **Puente del Milenio** de Londres. El proyecto es de un arquitecto, NORMAN FOSTER, y un escultor, ANTHONY CARO. A posteriori intervinieron los ingenieros de *Ove Arup & Partners*; después de inaugurada han surgido en ella serios problemas de vibraciones (1).

Pensamos que siempre ha sido y será una relación compleja la del arquitecto y el ingeniero porque cada uno sabe que donde él es más débil es donde el otro es más fuerte; pero, a pesar de la diferencia de mentalidades, la colaboración entre ambas profesiones actualmente es un hecho generalizado en todas las obras en que resulta necesaria, y además va en aumento porque la construcción es cada vez más compleja y los equipos multidisciplinares son cada vez más eficaces.

En general, cuando se ha abordado el tema de la relación arquitectos/ingenieros se ha hecho desde la arquitectura, donde el papel del ingeniero será siempre secundario, sin olvidar que según crece la escala de la obra, la importancia del ingeniero va siendo cada vez mayor. Esta escala se puede manifestar de diferentes formas: la altura de los grandes rascacielos, donde ingenieros como FAZLUR KHAN o LESLIE E. ROBERTSON (2) han sido decisivos en el proyecto de muchos de ellos; la luz de los grandes pabellones deportivos o de otros usos, donde ingenieros como EDUARDO TORROJA, PIER LUIGI NERVI, RICARDO MORANDI, o ULRICH FINSTERWALDER tuvieron aportaciones singulares. Los grandes espacios de la arquitectura actual también requieren intervención

Fig. 5. Nave central de la Catedral de Santiago de Compostela. S. XII. Fig. 6. Nave central de la catedral de León. S. XIII. Fig. 7. Pasarela del Milenio. Londres. N. Foster Arq. A. Caro Escultor. Ove Arup & Partners Ings.

de ingenieros de la categoría de OVE ARUP, EDMUND HAPPOLD y PETER RICE, que han sido decisivos en obras singulares de la arquitectura, como la **Ópera de Sydney**, el **Centro Pompidou** de París, o el **Banco de Hong Kong**³.

Pensamos que el tema de la relación ingenieros/arquitectos se debe abordar en toda su amplitud; no se trata sólo de conocer la colaboración de los ingenieros en las obras de arquitectura, sino conocer también la colaboración de los arquitectos en las obras de ingeniería, que tiene también una larga e interesante historia.

Hay obras donde la colaboración entre ingenieros y arquitectos se puede plantear en pie de igualdad, y en ellas es, en mi opinión, donde la colaboración es más fructífera y satisfactoria. Esto se produce con frecuencia en proyectos de grandes instalaciones deportivas, o de estaciones de transporte, o muchas otras obras que, por su carácter, la aportación de ambos puede estar equilibrada.

Vamos a hacer una revisión histórica de la relación de ambas profesiones, orientada principalmente hacia el in-

Fig. 8. Ópera de Sydney. J. Utzon Arq. Over Arup & Partners Ings. Fig. 9. Cúpula de Santa María del Fiore. Florencia. F. Brunelleschi. S. XV.



geniero, cuya historia es menos conocida, y centrada fundamentalmente en nuestro país.

II. Las diferentes ingenierías

Al plantear la relación entre ingenieros y arquitectos nos estamos refiriendo únicamente a los ingenieros civiles, es decir a los ingenieros que se dedican a la construcción, y especialmente a los dedicados al estudio de las estructuras resistentes, que son los que tienen una relación más directa con los arquitectos. Pero la ingeniería, desde sus orígenes, abarca un campo mucho más amplio que el del arte de construir.

Igual que la ingeniería se disoció de la arquitectura, dentro de la ingeniería se han disociado los diferentes campos, y así se han creado las diferentes ramas actuales de la ingeniería; pero todas ellas tienen un tronco común, que es su actuación en el medio natural para transformarlo y adaptarlo a las necesidades del Hombre. Pero este medio natural es muy diverso y por ello el área de actuación y la forma de actuar de cada rama de la ingeniería es muy dispar. Poco tiene que ver el campo de actuación de la ingeniería química con el de la ingeniería de infraestructuras, generalmente llamada de Obras Públicas, que es la actividad principal de los ingenieros civiles. Nosotros nos vamos a referir a estos ingenieros, es decir, a los que están relacionados con la construcción en general, y con las estructuras resistentes en particular. Pero, como veremos, los primeros profesionales que se consideraron ingenieros estaban más relacionados con las máquinas y la ingeniería militar, que con lo que hoy se incluye en la ingeniería civil. Anteriormente esta actividad estaba estrechamente unida a la profesión de arquitecto, hasta que a finales del siglo XVIII y principios del XIX, se produjo la separación de ambas profesiones en los distintos países. Uno de los países que inició este proceso fue Francia, y posteriormente muchos países siguieron su ejemplo, entre ellos España, que en todo este proceso siguió fielmente las pautas francesas con medio siglo aproximadamente de retraso.

Del carácter indiferenciado de la ingeniería en su origen fue un buen ejemplo el *Cuerpo de Ingenieros de Caminos y Canales* en España, que se formó a partir del *Real Gabinete de Máquinas* que creó AGUSTIN DE BETANCOURT, el hombre clave de la formación del cuerpo de ingenieros y de la *Escuela de Ingenieros de Caminos y Canales*. AGUSTIN DE BETANCOURT abarcó todos los campos de la ingeniería: la hidráulica, la construcción, la minería, las máquinas, las comunicaciones, etc. Era lo que podemos llamar un ingeniero completo, porque abarcaba las diferentes ramas de la ingeniería actual. Poco después de BETANCOURT, la ingeniería se fue disociando en España en las distintas especialidades que hoy existen (4).

III. Evolución de las profesiones de ingeniero y arquitecto

Si actualmente la diferencia entre arquitectura e ingeniería es relativamente clara, no ha sido así a lo largo de la mayor parte de la Historia, porque hasta finales del siglo XVIII eran una sola profesión o estaban estrechamente ligadas.

Los grandes tratados de arquitectura, desde los romanos, hasta el siglo XVI, nos van a servir para conocer la idea de lo que se consideraba que debía ser un arquitecto. El tratado de Arquitectura de VITRUBIO lo define muy claramente en el Capítulo I del Libro I, que se refiere a la educación del arquitecto (5):

El arquitecto debe estar impuesto en muchas ramas del saber y reunir conocimientos de muchos campos distintos porque en su obra se contrastan el valor de las ciencias y de las artes. Las fuentes de su conocimiento son la práctica y la teoría.

En el capítulo III del mismo libro, define las partes de la arquitectura: *comprende la arquitectura la construcción, la gnomónica o fabricación de los relojes de sol, y el montaje de las máquinas. La construcción a su vez comprende: el emplazamiento y fortificación de ciudades, las obras de carácter público y la construcción de viviendas privadas. Los edificios y obras públicas son de tres clases. Los que se refieren a necesidades de defensa contra los enemigos, lo que se construyen para dedicarlos a los dioses y los del orden y propósito civil para el bien general.*

Aparece una nueva dimensión del arquitecto que es la de ingeniero militar, y esta actividad se refiere no sólo a las fortificaciones de las ciudades, sino también a las máquinas de guerra. El libro X del tratado de VITRUBIO está dedicado a las máquinas, tanto a las de construcción como a las de guerra. El libro VIII está dedicado a las obras hidráulicas, y el Capítulo XII del libro V, está dedicado a los puertos, rompeolas, y astilleros, y en él se describen las ataguías y las ruedas de achique para vaciarlas de agua. Como se puede ver, es un tratado completo de arquitectura, de ingeniería civil, y de ingeniería militar, tal como actualmente se entienden estas profesiones.

Sin embargo, desde los griegos existen arquitectos e ingenieros, diferenciados profesionalmente. Los ingenieros eran los que hacían máquinas, fortificaciones y otros aparatos similares. El arte de construir estaba incluido en la arquitectura, y con frecuencia las dos profesiones las ejercían las mismas personas. ARQUIMEDES, el gran sabio de la 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 (6).

En Roma existió el pontífice, que en su origen era el constructor de puentes, pero muy pronto este cargo per-

dió su sentido etimológico; pasó a ser un alto funcionario del Imperio. Hubo también otros cargos relacionados con las obras públicas, como los *curatur viarum*. Los romanos, grandes constructores, aportaron poco a las ciencias y a las técnicas.

En la Edad Media hay pocos tratados dedicados a la ingeniería. Uno de los más conocidos es el del arquitecto francés VILLARD DE HONNECOURT en el siglo XIII, que escribió sobre muchos tipos de máquinas, entre ellas las sierras hidráulicas; también escribió sobre puentes de madera y máquinas de guerra, entre ellas las grandes catapultas. También dedicó parte de sus escritos a los autómatas y relojes, que van a ser una parte importante del trabajo de los ingenieros; uno de los autómatas de VILLARD DE HONNECOURT es un águila que giraba la cabeza cuando el diácono iniciaba la lectura del evangelio. Otro tratado medieval importante es el de GUY DE VIGEVANO sobre máquinas de guerra, escrito en el siglo XIV; en él se describen barcos, carros y torres de asalto (7).

En el Renacimiento se publicaron muchos tratados de arquitectura e ingeniería, y en ellos siguen mezclados temas de ambas profesiones, si bien se empieza a crear una cierta diferenciación entre ellas.

En Italia, LEONARDO DA VINCI es calificado de *ingeniarium ducalis*, y en España existe la profesión de ingeniero, diferenciada del arquitecto, pero referida principalmente a los ingenios y las máquinas, más que al arte de construir. Unos son maquinarios como PEDRO JUAN DE LASTANOSA; otros son relojeros como JUANELO TURRIANO, relojero del Rey, de origen italiano, que construyó el *artificio de Juanelo* para subir agua del río Tajo a la ciudad de Toledo, una de las obras más ingeniosas que se han hecho para elevar agua. Está resuelta mediante cazos oscilantes que se movían gracias a unas ruedas hidráulicas situadas en el río (8).

A JUANELO se le atribuyó el mejor tratado de ingeniería hecho en España: *Los veintiún libros de los Ingenios y Máquinas* (9), escrito en la segunda mitad del siglo XVI, si bien ha quedado claro que JUANELO no lo pudo escribir. Se ha atribuido también a LASTANOSA, pero tampoco está claro (10); lo que sí parece seguro es que fue escrito por un ingeniero o ingenieros aragoneses, como lo era LASTANOSA (11). Es un tratado dedicado fundamentalmente a las obras hidráulicas, aunque también estudia molinos y puentes de diversos tipos.

Es difícil en este periodo identificar a los ingenieros y a los arquitectos, porque los diferentes profesionales dedicados al arte de construir tenían muy diversas procedencias: los que estudia-



Fig. 10. Torres gemelas. Nueva York.

ban en universidades, los que aprendían con otro arquitecto o ingeniero, o los que procedían de maestros canteros.

Un primer intento de crear una escuela de ingeniería en España la promovió FELIPE II en Madrid, la *Academia Real Mathematica*, y encargó un plan de estudios a JUAN DE HERRERA, arquitecto real, que tenía una buena formación técnica. Suyos son dos de los puentes de piedra más perfectos de nuestro país, el **Puente de Segovia** sobre el río Manzanares en Madrid, 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. El ambicioso plan de estudios de HERRERA no se llevó a la práctica, pero la *Academia Real*, con un plan de estudios más modesto, funcionó durante muchos años (11).

Los dos tratados de arquitectura del Renacimiento más conocidos son probablemente el de LEON BAUTISTA ALBERTI, del siglo XV, *De Re aedificatoria* (12); y el de ANDREA PALLADIO del siglo XVI, *Los Cuatro Libros de Arquitectura*. En ellos, igual que en el tratado de VITRUBIO y probablemente influidos por él, se tratan temas de arquitectura e ingeniería; desde el punto de vista actual, más que tratados de arquitectura se pueden considerar tratados del arte de construir.

El libro IV de ALBERTI trata de las obras públicas: el capítulo V se refiere a la construcción de vías de tráfico tanto urbanas como interurbanas, el capítulo VI trata de los puentes de madera y piedra, y el VII de las alcantarillas, y de los ríos y canales navegables.

El libro X está dedicado principalmente a las obras hidráulicas: el capítulo VII está dedicado a las conducciones de agua, el capítulo VIII a las cisternas, el X a las vías de navegación, el XI a los canales, y el XII a los puertos.

En el tratado de ANDREA PALLADIO (13), más limitado que el de ALBERTI, una gran parte del libro III está dedicado a las obras públicas; en él estudia las vías públicas y los puentes, tanto de madera como de piedra. Sus prototipos en ambos materiales tuvieron gran trascendencia en los puentes del Renacimiento.

El gran ingeniero del Renacimiento fue sin duda LEONARDO DA VINCI, paradigma del hombre renacentista. Figura compleja y controvertida, es difícil de definir en pocas palabras. Se puede decir que profesionalmente fue fundamentalmente un ingeniero, y de ello es buen testimonio su presentación a Lu-



Fig. 11. Edificio Sears. Chicago.



Fig. 12. Puente de Segovia en Madrid sobre el río Manzanares. Juan de Herrera. 1589.



Fig. 13. Puente de Torrelodones sobre el río Guadarrama. Juan de Herrera.

DOVICO SFORZA en 1482, donde primero se manifiesta como ingeniero militar, enumerando todas sus posibilidades en este campo, y por último le dice que en tiempo de paz puede, como arquitecto, construir edificios públicos y privados, o conducir agua de un lugar a otro.

En términos parecidos se expresa GALILEO GALILEI, a principios del siglo XVII, al dirigirse al secretario del DUQUE DE TOSCANA, donde se refiere a su gran cantidad de inventos "tan útiles como dignos de curiosidad y admiración, que tan solo el exceso me perjudica (14)".

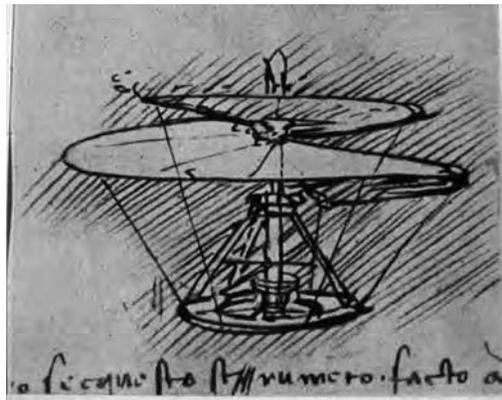
LEONARDO, sin estudios universitarios, se formó inicialmente en el taller de VERROCCHIO, persona de gran cultura, y posteriormente con la lectura de todos los libros que pudo encontrar. Tuvo por ello una formación inicialmente práctica, que luego complementó con la base teórica de los libros, y de su relación con la gente ilustrada de las distintas cortes donde pasó su vida.

De LEONARDO se han dicho cosas extremas, desde que fue un adelantado a su tiempo y precursor de ciencias y técnicas, hasta que no hay ninguna aportación técnica original en ninguno de los campos en los que trabajó, y que su aportación científica fue mínima

o nula. Sin entrar en esta polémica, creo que sí se puede asegurar que LEONARDO DA VINCI fue un hombre con una ilimitada ambición de saber, y que intentó dar una base científica a los diversos campos de la ingeniería que estudió; en algunos, llegó a conclusiones válidas, pero en la mayoría, fundamentalmente planteó interrogantes que después fue resolviendo la ciencia (7).

Un buen ejemplo de su forma de trabajo es su estudio sobre el comportamiento a flexión de la viga, que se encuentra en el *Código de Madrid I*. En este estudio LEONARDO planteó que la fibra superior, es decir, la más próxima al centro de curvatura de la deformada, se acorta, la inferior se alarga, y la fibra media no varía de longitud. La deformación de las fibras intermedias es proporcional a su distancia a la fibra media. LEONARDO, como en tantos otros temas, se limitó a esta descripción, sin intentar cuantificar el fenómeno. El primero que intentó llegar a un conocimiento científico de la flexión fue GALILEO GALILEI, que estudió la viga apoyada y la ménsula; pero su hipótesis sobre la distribución de tensiones en la sección de la viga debidas a la flexión, están mucho más lejos de la realidad que las intuiciones de LEONARDO (15).

Fig. 14. Transporte de un cañón. Dibujo de Leonardo da Vinci.
Fig. 15. Máquina de vuelo. Dibujo de Leonardo da Vinci.
Fig. 16. Fachada principal del Museo del Prado. Juan de Villanueva. S. XVIII.





IV. Disociación de las profesiones de Ingeniero y Arquitecto

Desde el Renacimiento, la complejidad de las distintas tecnologías va siendo cada vez mayor, y cada vez va habiendo más arquitectos o ingenieros con un cierto grado de especialización, hasta llegar al siglo XVIII donde se produce la disociación institucional de las dos profesiones.

La primera separación que se produjo fue la de los ingenieros militares. En España, el *Cuerpo de Ingenieros Militares* se inició en 1711 con la aprobación por FELIPE V de la organización del cuerpo, y se consolidó en 1718 con la promulgación de sus Ordenanzas. Dos años después se restableció la *Real Academia Militar de Matemáticas de Barcelona*, fundada en 1694, pero hasta 1720 tuvo una vida precaria e intermitente. La actividad de los ingenieros militares, el primer cuerpo institucionalizado de ingenieros en nuestro país, no se limitó únicamente al campo militar, sino que intervinieron también en las obras públicas, tanto en los caminos, como en los canales, abastecimientos de agua y puer-

Fig. 17. Puente de Toledo sobre el río Manzanares en Madrid. Pedro de Ribera. 1735.
Fig. 18. Puente Largo de Aranjuez. Marcos de Vierma. S. XVIII.

tos, y esta actividad la mantuvieron hasta que se creó el *Cuerpo de Ingenieros de Caminos y Canales* (16).

La intervención de los ingenieros militares en las obras públicas no excluyó a los arquitectos, que siguieron trabajando en ellas de forma generalizada; de ello hay muchos ejemplos en España en el siglo XVIII: JUAN DE VILLANUEVA, arquitecto del *Museo del Prado*, traza carreteras y construye puentes. Suyo es el proyecto de la *Carretera de Villalba a Segovia* por el puerto de Navacerrada, terminada a principios del siglo XIX. PEDRO DE RIBERA, arquitecto de la *Ermida de San Antonio de la Florida* es también autor del *Puente de Toledo* sobre el río Manzanares en Madrid. MARCOS DE VIERMA, también arquitecto, construye carreteras y puentes, entre ellos el *Puente Largo de Aranjuez* y el *Puente de Viveros*, ambos sobre el río Jarama (17).

A mediados del siglo XVIII se iniciaron en Europa los cuerpos de ingenieros civiles, y poco tiempo después las escuelas correspondientes de formación de ingenieros. En 1716 se creó en Francia el cuerpo de *Ingenieurs des Ponts et Chaussées*, a partir de los arquitectos al servicio del Rey. El primer *premier ingénieur* fue JACQUES

Fig. 19. Pont Gabriel sobre el Loira en Blois. Jaques V Gabriel. S. XVIII.



Fig. 20. Pont Royal sobre el Sena en París. Jaques IV Gabriel. S. XVII.
Fig. 21. Puente de la Concorde sobre el río Sena en París. J.R. Perronet. 1791.



V GABRIEL, autor del **Pont Gabriel**, sobre el Loira en Blois, en nuestra opinión una de las composiciones más perfectas en lomo de asno con arcos de luces decrecientes del centro a los extremos. Es hijo del arquitecto JACQUES IV GABRIEL, que construyó el **Pont Royal** de París, puente que sirvió de modelo a muchos de los puentes de piedra que se construyeron en Francia en el siglo XVIII (18).

En 1747 se creó *L'École des Ponts et Chaussées*, cuyo primer director fue JEAN RODOPHE PERRONET, ingeniero francés nacido en Ginebra (19).

En España y otros países de Europa el proceso fue similar, pero con medio siglo de retraso, y claramente influido por el francés. El hombre clave de este proceso en España, como ya hemos dicho, fue AGUSTIN DE BETANCOURT, que desde 1785 a 1791 fue becado por el MARQUÉS DE FLORIDABLANCA para estudiar hidráulica en París, en *L'École de Ponts et Chaussées*, junto con otros becarios.

En 1791 volvió a España para crear el *Real Gabinete de Máquinas* a base de los planos y modelos que él había hecho y conseguido en Francia. Este *Real Gabinete* se instaló en el Palacio del Buen Retiro, y fue el embrión del cuerpo de Ingenieros de Caminos y Canales, que se creó en 1799 con el nombre de *cuerpo facultativo de la inspección general de Caminos y Canales*. Su segundo Inspector General fue AGUSTIN DE BETANCOURT, y en 1803 le cambió el nombre por *Cuerpo de Ingenieros de Caminos y Canales*. En este mismo año AGUSTIN DE BETANCOURT escribió una memoria titulada *Noticia del estado actual de los caminos y canales en España. Causa de sus atrasos y defectos y medios de remediarlos en adelante* (4). En este escrito se mete duramente con los arquitectos por la deficiente construcción de los puentes españoles: "*La total ignorancia de los arquitectos en este genero de obras, por no tener la menor idea de los principios de hidráulica, es causa de este lastimoso mal*" Es claro que en este escrito Betancourt ataca fun-

damentalmente a los arquitectos como constructores de puentes y carreteras, y no a los ingenieros militares, lo que nos indica que eran predominantemente los arquitectos los que hacían estas obras.

La *Escuela de Caminos y Canales* se inició con los *Estudios de la Inspección general de caminos*, que en 1803, por decisión de BETANCOURT, su primer director, respaldada por Real Orden, pasó a llamarse *Escuela de Caminos y Canales*.

La Escuela tuvo un difícil comienzo porque estuvo cerrada en varias ocasiones por motivos políticos. Su fundador, AGUSTIN DE BETANCOURT terminó sus días exiliado en Rusia, donde dejó una gran parte de su labor como ingeniero. Pero la fundación de la Escuela y su posterior desarrollo, definió en España la profesión de ingeniero.

La profesión de arquitecto, como hemos visto, ha tenido una definición clara a lo largo de la Historia, aunque sus límites hayan ido variando con el tiempo. Podemos decir que hasta la creación de los cuerpos de ingenieros, en la arquitectura se incluía todo el arte de construir, y las máquinas.

Pero el título de arquitecto no estaba claramente regulado en España, hasta que en 1757 se creó la *Real Academia de Nobles Artes de San Fernando*, que desde su principio se convirtió en el único centro de enseñanza que podía otorgar título oficial de arquitecto, anulando los innumerables títulos que conferían ciudades, cabildos o gremios. En esta ordenación se siguió, igual que más tarde en los ingenieros, el modelo francés de la *Academia de Nobles y Bellas Artes*. La *Escuela Superior de Arquitectura*, independiente de la *Real Academia de Nobles Artes*, se creó en España en 1844, casi un siglo después que ésta (20).

A principios del siglo XIX, en Francia, y por reflejo en España, la disociación de las profesiones de arquitecto e ingeniero llevó a un alejamiento cada vez mayor entre unos y otros profesionales, motivada en gran parte por el tipo de enseñanza que recibían. En la *Academia*



Fig. 22. Puente de Alcántara sobre el río Tajo. Prov. De Cáceres. C.J. Lacer. S. II.
Fig. 23. Puente de Coalbrookdale sobre el río Severn, Inglaterra. T.F. Pritchard Arq. A. Darby III fundidor. J. Wilkinson maestro de fundición. 1779.

de San Fernando la formación de los arquitectos era muy tradicional, basada fundamentalmente en un conocimiento histórico de la arquitectura, en los órdenes arquitectónicos, y con un conocimiento mínimo de las técnicas de construcción y de los materiales. En la *Escuela de Ingenieros de Caminos y Canales*, en cambio, se hacía énfasis en la formación científico-técnica, partiendo de una amplia formación de matemáticas. Era el arte, tal y como se definía en aquel momento, frente a la técnica emergente. Podemos decir que en la enseñanza de la arquitectura dominaba su historia; en cambio la enseñanza de la ingeniería, que se consideraba una profesión nueva, se basaba casi exclusivamente en una formación científico-técnica.

Este carácter innovador y progresista de los ingenieros trasciende a la sociedad y por ello la *Escuela de Ingenieros de Caminos y Canales* de Madrid es considerada como un centro de ideología constitucional y liberal, lo que provocó su cierre en sucesivas ocasiones, y el exilio de algunos de sus miembros más notables entre otros, como hemos dicho, su primer director AGUSTIN DE BETANCOURT.

Otra diferencia básica es que los ingenieros se organizaron desde el principio como cuerpo del Estado; en cambio la profesión de arquitecto era fundamentalmente libre, aunque una parte de ellos trabajaba en Ayuntamientos y otras corporaciones, pero que siempre tenían menos fuerza que el Estado Central.

JEAN RODOLPHE PERRONET, el primer director de *L'Ecole de Ponts et Chaussées* de París, en su *Description des projets et de la construction des Ponts*, considera que de obras anteriores a las suyas es imposible obtener ningún conocimiento útil, planteamiento que revela claramente cual era la forma de pensar de los nuevos ingenieros. En nuestra opinión esta afirmación de PERRONET es excesivamente radical (21). CARLOS FERNANDEZ CASADO, profesor de puentes de la *Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid*, escribió que nadie

en España debía proyectar un puente sin haber pasado antes por el de **Alcántara** (22).

La forma de pensar de PERRONET, muy generalizada entre los ingenieros, ha hecho que con frecuencia éstos adolezcan de una excesiva falta de conocimiento de su propia historia; y en toda actividad creativa con dimensión expresiva y por tanto cultural, es importante conocer la propia historia. Se puede discutir cuales son los períodos anteriores que tienen influencia en nuestro quehacer actual, pero es indudable que necesitamos conocer obras anteriores para poder hacer obras nuevas. El arquitecto ha sido y es consciente del valor y la necesidad de conocer su propia historia; el ingeniero con frecuencia no lo es.

En el siglo XIX, probablemente el más brillante de la ingeniería civil, se produjo un espectacular desarrollo de todas las ramas de la ingeniería. Centrándonos en la construcción, la aparición del hierro, nuevo material, y conocer el comportamiento resistente de las estructuras, dieron lugar a su espectacular desarrollo. Entre el **Puente de Coalbrookdale**, el primer puente metálico, de 30 me-

Fig. 24. Puente del Firth of Forth, Escocia. 1890. J. Fowler y B. Baker. Luz 521 metros.





Fig. 25. Cristal Palace. Londres. Paxton. 1851.

tros de luz, y el **Puente de Firth of Forth** de 521 metros de luz, transcurre poco más de un siglo, exactamente 111 años. Pero este rápido desarrollo de la ingeniería civil creó también problemas y desajustes. Las dificultades técnicas que se planteaban en los puentes y en las estructuras, eran cada vez mayores, y por ello los ingenieros del siglo XIX, dedicaron su mayor atención a estos problemas, olvidando con frecuencia, e incluso despreciando en ocasiones, el proceso creativo que lleva a una buena obra que, si bien es inseparable del proceso resistente, va más allá de él.

Por otro lado, los arquitectos conocían mal el desarrollo tecnológico que produjo la aparición de los nuevos materiales, primero el hierro, y luego el hormigón, que tuvieron una influencia decisiva en la ingeniería y la arquitectura.

Estos planteamientos de tendencias generales no niegan la existencia de ingenieros brillantes con un alto nivel cultural, que hicieron grandes obras; y por otro lado la existencia de grandes arquitectos con un buen nivel de conocimientos técnicos, que les permitió hacer arquitectura de vanguardia con los nuevos materiales.

La definición de las dos profesiones, y sobre todo, sus competencias, dio lugar durante el siglo XIX y principios del XX, a la polémica entre arquitectos e ingenieros en el campo de la construcción, que ya hemos citado y que tuvo mucha trascendencia en la sociedad; esta polémica se inició en Francia y se propagó a otros países de Europa que habían seguido el modelo francés, entre ellos España.

La polémica fue principalmente corporativa, es decir, un conflicto de competencias profesionales y de status, porque mientras la arquitectura era una pro-

fesión liberal, los ingenieros formaban un cuerpo del Estado, lo que reivindicaban los arquitectos. Pero esta polémica también se extendió a problemas de identidad de cada una de las profesiones; por ello resultó clarificadora en muchos aspectos y sirvió para superar en parte ese divorcio entre arte/arquitectura y técnica/ingeniería.

Como hemos dicho, a los arquitectos les costó trabajo incorporarse a los nuevos materiales, sobre todo a la arquitectura del hierro. Tres obras se pueden considerar claves en el desarrollo de esta arquitectura: El **Cristal Palace** de PAXTON, construido para la Exposición Universal de Londres de 1851, la **Torre Eiffel**, y la **Galería de las Máquinas** construidas para la Exposición de París de 1889. Es importante destacar que, a pesar de la polémica y falta de entendimiento entre las dos profesiones, en la **Torre Eiffel** colaboraron los ingenieros EIFFEL, KOECHLIN, y NOUGUIER, con el arquitecto SAUVESTRES, y en la **Galería de las Máquinas** el ingeniero CONTAMIN con el arquitecto DUTERT. En ambas obras la intervención de las dos partes fue decisiva, pero el planteamiento inicial fue de los ingenieros. Las Exposiciones Universales y las estaciones de ferrocarril fueron un excelente lanzamiento de la arquitectura del hierro, promovida fundamentalmente por los ingenieros (23).

Pero igual que ha ocurrido con la mayoría de las innovaciones en la construcción, la arquitectura del hierro fue muy duramente criticada; una de las más duras fue la famosa carta de los "Artistas" contra la **Torre Eiffel**, y también la de WILSON MORRIS contra el **Puente del Firth of Forth** que nos parece muy ilustrativa: "nunca habrá arquitectura del hierro, los progresos en maquinaria han sido cada vez más feos hasta llegar al supremo espécimen de la fealdad, el **Forth Bridge**" (24). Actualmente la valoración de este puente es la contraria, y prueba de ello es el interés que despertó su centenario; se publicaron ininidad de libros y artículos sobre él.

En el primer congreso de arquitectura de Madrid celebrado en 1881, JOSÉ DOMÉNECH considera que el problema de la arquitectura del hierro es que está hecha por ingenieros que desprecian "completamente

Fig. 26. Torre Eiffel. París. 1889. G. Eiffel, Koechlin y Nougier Ings. Sauvvestres Arq.
Fig. 27. Galería de las Máquinas. París 1889. Contamin Ing. Dutert Arq.
Fig. 28. Hipódromo de la Zarzuela en Madrid. E. Torroja Ing. Arniches y Domínguez Arqs.





Fig. 29. Puente de Alejandro III sobre el Sena en París. 1901. J. Resal Ing. Cassien-Bernard y Causin Arqs. Luz 107 m.
Fig. 30. Puente de George Washington sobre el río Hudson. Nueva York 1931. O. Ammann Ing. C. Gilbert Arq. Luz 1067 m.

las proporciones y leyes del buen gusto"; y CABELLO Y Aso catedrático de la Escuela de Arquitectura le contesta que "las construcciones solo de hierro no son verdaderamente obras de arquitectura" y continúa que "el arte va cediendo a la industria; el arquitecto no debe hacerse cómplice de esta muerte insensible del arte" (20).

Aunque la línea oficial de la arquitectura era contraria a los nuevos materiales, hay arquitectos en el siglo XIX que se rebelan contra esa posición, y proyectan edificios con estructuras de hierro, iniciando la "escuela racionalista". Entre ellos se puede citar en Francia a HENRI LABROUSTE, duramente atacado por la Academia, y a J. BOGARDUS en Estados Unidos (23). Pero es a principios del siglo XX cuando se produce una profunda transformación generalizada en la arquitectura, al aceptar las innovaciones tecnológicas y los nuevos materiales como parte fundamental de la nueva arquitectura. Si el hierro fue atacado y despreciado durante muchos años, el hormigón armado se aceptó más fácilmente. Se llegó así a la arquitectura contemporánea, que ha dominado casi todo el siglo XX. El arquitecto se incorporó a las nuevas tecnologías de la construcción y esto supuso una superación casi completa de la polémica arquitectos/ingenieros.

París de 1889, hay colaboración entre ingenieros y arquitectos, e igualmente podemos citar muchas otras obras de este siglo.

Pero es en el siglo XX cuando esta colaboración se generaliza y se hace más fructífera. Uno de los ejemplos más extraordinarios de esta colaboración en la primera mitad del siglo es la del ingeniero EDUARDO TORROJA. Sus tres obras fundamentales, las cubiertas laminares del **Hipódromo de la Zarzuela** en Madrid, del **Mercado de Algeciras**, y del **Frontón Recoletos** las hace en colaboración con cuatro arquitectos que tenían una fuerte personalidad: el **Hipódromo de la Zarzuela** con ARNICHES y DOMINGUEZ, con los que trabajó también en los **Pabellones del Instituto Escuela** con sus viseras de hormigón armado. El **Mercado de Algeciras** con SANCHEZ ARCAS, un conocedor de las láminas, sobre las que publicó varios libros en su exilio, en Alemania. Y por último el **Frontón Recoletos** con SECUNDINO ZUAZO, uno de los arquitectos con más personalidad del Madrid de la preguerra. Las tres obras se hicieron en colaboración; no vamos a entrar en quien tiene una participación más destacada en esta colaboración, pero en las tres obras, los elementos principales y más expresivos son las cubiertas laminares, y el que mejor las conocía era sin duda EDUARDO TORROJA (26).

Fig. 31. Puente de Bronx-Whitestone en Nueva York. 1939. O. Ammann Ing. A. Embury Arq. Luz 701 m.

V. La colaboración entre Ingenieros y Arquitectos

A pesar de las dificultades que se produjeron en el siglo XIX en la relación arquitectos/ingenieros, la colaboración entre ellos existió desde que fue necesaria. En el primer puente de hierro construido en 1779, el **Coalbrookdale**, sobre el río Severn en Inglaterra, colaboraron el arquitecto THOMAS F. PRITCHARD, el fundidor ABRAHAM DARBY III, y el maestro de fundición JOHN WILKINSON. La innovación que suponía esta obra requirió la colaboración de distintos profesionales (25).

Hemos visto también que en la **Torre Eiffel** y en la **Galería de las Máquinas**, ambas de la exposición de





Fig. 32. Segundo puente del Estrecho de Tacoma cerca de Seattle EEUU. 1948. D.R. Smith, N.E. O'con, y E.H. Thomas. Luz 853 m.

Fig. 33. Puente de Rodenkirchen sobre el Rin. Alemania. 1941. F. Leonhardt Ing. P. Bonatz Arq. Luz 370 m.



Mucho se ha escrito y mucho se puede decir de la colaboración entre arquitectos e ingenieros, y ya nos hemos referido a los ingenieros FAZLUR KHAN, LESLIE ROBERTSON, OVE ARUP, EDMUND HAPPOLD y PETER RICE cuya labor profesional ha sido hecha casi enteramente en colaboración con arquitectos. Pero nos vamos a referir ahora a la intervención de los arquitectos en las obras de ingeniería y más concretamente en los puentes.

Antes nos hemos referido a la polémica que se ha planteado recientemente por la intervención de los arquitectos en los puentes como diseñadores exclusivos, pero esto no quiere decir que la exclusividad deba tenerla el ingeniero. La colaboración entre ingenieros y arquitectos en el proyecto de puentes tiene una larga tradición, que en nuestra opinión ha sido positiva muchas veces, pero debe dar lugar a un proyecto hecho en conjunto, no por adición de actuaciones distintas, como hoy en día ocurre en algunos proyectos. No es nueva esta forma de hacer, porque ya en el **Puente de Alejandro III** sobre el Sena en París, un arco de 107 metros de luz terminado en el primer año del siglo XX, proyecto del ingeniero JEAN RESAL, se sacó a concurso la

decoración, con independencia del proyecto del puente, que ganaron los arquitectos CASSIEN-BERNARD y CAUSSIN. El resultado, a pesar de las guinaldas, no es malo, porque se conserva plenamente la potencia del arco (27).

En la mayoría de los grandes puentes colgantes americanos figuran arquitectos en su proyecto. Con el ingeniero de origen suizo OTHMAR AMMANN trabajó el arquitecto CASS GILBERT, en los proyectos de los puentes de **George Washington**, y en el de **Bayona**, y el arquitecto AYMAR EMBURY en el **Bronx-Whitestone** y en el **Triborough**, el peor de los puentes de AMMANN. En el **Golden Gate**, con los ingenieros JOSEPH B. STRAUSS y CHARLES ELLIS trabajaron los arquitectos JOHN EBERSON primero, e IRVING F. MORROW después (28). A éste último se deben las chapas facetadas que cubren las vigas trianguladas de las riostras de las torres, solución mucho más satisfactoria que la del puente del **Estrecho de Mackinac** de STEINMAN o del segundo puente de **Tacoma**, donde se dejó la triangulación de las riostras a la vista.

Ha habido y hay arquitectos que han intervenido en muchos puentes porque les han dedicado una gran parte de su vida profesional. Entre ellos podemos citar tres



Fig. 34. Nordbrücke sobre el Rin en Dusseldorf. Alemania. Hein Lehmann y Leonhardt y Andra Ings. F. Tamms Arq. Luz 260 m.

Fig. 35. Puente Severin sobre el Rin en Colonia. 1962. Arq. G. Lohmer. Luz 301 m.





alemanes: PAUL BONATZ que intervino en la mayoría de los puentes de las primeras autopistas alemanas, anteriores a la Segunda Guerra Mundial; trabajó con ingenieros de la talla de EMIL MORSCH, FRANZ DISCHINGER y FRITZ LEONHARDT; con este último hizo el **Puente de Rodenkirchen** sobre el Rin cerca de Colonia (28). FRIEDRICH TAMMS, trabajó en muchos puentes antes de la Segunda Guerra Mundial, pero quizás, su intervención más destacada ha sido en los tres primeros puentes atirantados de Dusseldorf, el **Nordbrücke**, el **Kniebrücke**, y el **Oberkassel**, que son diferentes, pero tienen una idea común: los tirantes en los tres forman haces paralelos y con muy pocos tirantes por haz (29). El tercer arquitecto alemán es GERD LOHMER, que empezó su carrera profesional colaborando con PAUL BONATZ, y después de la Segunda Guerra Mundial intervino en muchos de los grandes puentes que se construyeron en Alemania en esa época, probablemente la más brillante de la ingeniería de puentes alemana. Entre los puentes donde ha intervenido LOHMER se puede destacar el **Severin** sobre el Rin en Colonia, uno de los primeros puentes atirantados, donde su idea de cómo debía ser la torre ha sido básica para el desarrollo posterior de estos puentes. Colo-

Fig. 36. Puente de Bendorf sobre el Rin. Alemania. 1962. U. Finsterwalder Ing. G. Lohmer Arq. Luz 28 m.
Fig. 37. Puente de Fehmarnsund. Alemania. 1962. T. Jahnke y P. Stein Ings. G. Lohmer Arq. Luz 248 m.

boró con el ingeniero ULRICH FINSTERWALDER en el puente de **Bendorf** sobre el Rin, un puente clave en los puentes de hormigón pretensado, y en el **Fehmarnsund** un puente *bowstring* sistema *Nielsen*, con arcos situados en planos inclinados, solución que después se ha utilizado con mucha frecuencia.

GERD LOHMER, al plantear la colaboración entre los ingenieros y los arquitectos en los proyectos de puentes, dice lo siguiente: “*Esta claro que los grandes puentes modernos son en primer lugar creaciones del ingeniero. De su talento, sus conocimientos, su valor y su coraje, depende la audacia de la construcción. Es totalmente responsable de la seguridad y estabilidad de la obra* (30)”.

En Francia actualmente hay varios arquitectos con dedicación análoga a la de los alemanes. Podemos citar a A. ARSAC, y A. SPIELMAN, que han intervenido en muchos de los grandes puentes franceses.

En el puente **Storebaelt**, un puente colgante de 1600 metros de luz, han colaborado con *Cowiconsult* los ingenieros autores del proyecto, los arquitectos daneses de *Dissing + Weitling* y su intervención ha sido significativa en

Fig. 38. Puente Storebaelt sobre el Gran Belt. Dinamarca. 1998. Cowiconsult Ings. Dissing + Weitling Arqs. Luz 1624 m.
Fig. 39. Puente Tatara. Japón. 1999. Luz 890 metros.



Fig. 40. Hangar de Orvieto. Italia. 1935. Pier Luigi Nervi.



la fisonomía final de las torres. El resultado, en nuestra opinión, es bueno.

Las torres del **Puente Tatara** en Japón se diseñaron por un comité al que pertenecían ingenieros de estructuras, ingenieros paisajistas e industriales, un arquitecto y un artista. Sorprendentemente el resultado es, en nuestra opinión,

mucho mejor de lo que se podía esperar con tantas intervenciones (31).

Por último quiero terminar con unas palabras de PIER LUIGI NERVI, escritas en 1961, que predicen con extraordinaria lucidez, uno de los problemas que actualmente se plantea en la arquitectura/ingeniería de las estructuras.

“Es necesario no olvidar que la riqueza de soluciones estáticas hechas posibles por la precisión de los sistemas de cálculo y por las cualidades de los materiales, puede conducir a esquemas estáticos antinaturales, es decir, a una arquitectura de estructuras que, en lugar de desarrollarse por un pensamiento lógico, resultado de los términos: belleza, armonía y sensibilidad, provienen de leyes impersonales del mundo estático a las cuales se les obliga a hacer acrobacias exhibicionistas” (32).

NERVI, ingeniero de origen, se puede considerar una de esas extraordinarias excepciones en el mundo actual, que en una misma persona reúne los saberes del ingeniero y el arquitecto. ♦

Referencias:

- (1) *Spans sway underfoot in Europe*. “Engineering News Record” July 10, 2000.
- (2) *Bridging the Gap – Rethinking the relationship of Architect and Engineer* – Chapter 5 – Richard Keating. *Collaboration of the culture of SOM (Skidmore, Owings & Merrill)*. Van Nostrand Reinhold – New York – 1991.
- (3) *L’Art de l’ingénieur*. Dirigido por Antoine Picon. Centre Georges Pompidou – Editions Le Moniteur – Paris 1997.
- (4) Antonio Rumeu de Armas – *Ciencia y tecnología en la España Ilustrada. La escuela de Caminos y Canales*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1980.
- (5) Marcus Vitruvius. *De Architectura*. Ediciones de Arte y Bibliofilia. U.R.T. 1973.
- (6) *Histoire general des Sciences. Tome 1 – La science antique et Médiévale* – Dirigida por René taton – Presses Universitaires de France. Paris 1966.
- (7) Bertrand Gille. *Les Ingenieurs de la Renaissance*. Hermann. Paris 1964.
- (8) Nicolás García Tapia – *Ingeniería y arquitectura en el Renacimiento Español* – Universidad de Valladolid 1990.
- (9) *Los veintinueve libros de los ingenieros y máquinas de Juanelo Turriano* – Fundación Juanelo Turriano. Madrid 1996.
- (10) Nicolás García Tapia – *Pedro Juan de Las-tanosa. El autor aragonés de los veintinueve libros de los ingenios* – Instituto de Estudios Altoaragoneses – Diputación de Huesca. Huesca 1990.
- (11) *Felipe II. Los ingenios y las máquinas* – Dirigido por Ignacio Gonzalez Tascón – Sociedad es-

- tatal para la conmemoración de los centenarios de Felipe II y Carlos V. 1998.
- (12) Leon Battista Alberti. *The Ten books of architecture – The 1755 Leoni Edition* – Dover Publications Inc. New York 1986.
- (13) Andrea Palladio. *I Quattro libri dell’Architettura* – Ulrico Hoepli Editore. Milano 1945.
- (14) Carlos Fernández Casado – *Tres momentos del ingeniero en la Historia. El ingeniero romano, el ingeniero renacentista y el ingeniero actual*. Homenaje a Xavier Zubiri. Madrid 1970.
- (15) *The Unknow Leonardo* – Editado por Ladislao Reti – Harry N. Abrams Inc. New York 1988.
- (16) Joan-Eugeni Sánchez. *Los ingenieros militares y las obras públicas del siglo XVIII* – En el libro *Cuatro conferencias sobre historia de la ingeniería de Obras Públicas en España* – Biblioteca CE-HOPU. 1987.
- (17) Pilar Chías Navarro, Tomás Abad Balboa – *Puentes de España*. Fomento de Construcciones y Contratos. 1994.
- (18) Jean Mesqui – *Les ponts en maçonnerie jusqu’a la fin du XVIII siècle* – En el libro - *Ponts de France* – Presses de l’ecole nationale des ponts et chaussées. Paris 1982.
- (19) *250 ans de l’Ecole des Ponts en cent portraits*. Dirigido por Guy Coronio. Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- (20) A. Bonet Correa, Fátima Miranda, Soledad Lorenzo – *La polémica ingenieros-arquitectos en España. Siglo XIX*. 1ª parte. A. Bonet Correa – *Razón e historia de un debate teórico profesional* – Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1985.
- (21) Jacques Fougerolle – *A propos des Ouvrages d’art* – Sin referencia Editorial.

- (22) Carlos Fernández Casado – *Historia del Puente en España. Puentes romanos* – Instituto Eduardo Torroja. Final del artículo del puente de Alcántara.
- (23) Sigfrido Giedion – *Espacio Tiempo y Arquitectura*. Editorial Dossat S.A. Madrid 1978.
- (24) C.E. Inglis – *The Aesthetic of Civil Engineering Design* – En el libro - *A record of six lectures on the aspect of Civil Engineering Design* – The Institution of Civil Engineers. London 1944
- (25) Ted Ruddock – *Arch bridges and their builders*. Cambridge University Press 1978.
- (26) Eduardo Torroja - *The structures of Eduardo Torroja* – F.W. Dodge Corporation, New York 1958.
- (27) Jacques Roche – *Les ponts metalliques jusqu’en 1939* – En el libro - *Ponts de France* – Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris 1982.
- (28) Leonardo Fernández Troyano – *Tierra sobre el agua – Visión histórica universal de los puentes* – Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos – Madrid 1999.
- (29) Rene Walter – *Critical appraisal of the collaboration between engineers and architects in bridge design* – Proceedings of the international symposium – IASS conceptual design of structures – October 1966 – Stuttgart.
- (30) Gerd Lohmer – *Le rôle de l’architecte dans la construction des ponts*. “L’architecture d’aujourd’hui”. Octobre-Novembre 1963.
- (31) Manabu Ito. *Wind effects improve tower shape*. “Structural Engineering International” November 1998.
- (32) Pier Luigi Nervi – *Relations entre architectes, ingénieurs et constructeurs*. “L’architecture d’aujourd’hui”. Diciembre 1961.