LOS PUENTES DEL TREN

JOSÉ SERNA GARCÍA - CONDE

PRESENTACIÓN Y EPÍLOGO: JAVIER RUI-WAMBA
COLABORA MERCEDES LÓPEZ

FUNDACION
ESTEYCO

Este libro invita a emprender de la mano de los puentes ferroviarios un peregrinaje estructural que se inicia con los primeros puentes de piedra o madera y cuyo itinerario llevará al lector desede los cuatro metros de luz del primer puente metálico a los más modernos puentes atirantados; desde los pequeños arcos de hormigón en masa a los grandes viaductos de hormigón pretensado y de los primeros avances por prueba y error a los sofisticados y exigentes criterios de diseño actuales.

Recorrido sobre el camino de hierro que muestra un extraordinariamente rico legado de innovadoras tipologías, materiales en constante evolución, desarrollos técnicos y tecnológicos, épicas construcciones y, por encima de ello, personas que con su ingenio han ido haciendo realidad los puentes de un tren que, como pocos, ha sido puente para el acercamiento de los pueblos y el progreso de las sociedades modernas.

Personas y obras de las que sólo cabe en este escrito recoger una pequeña parte, y a las que habrá que añadir las de una de las páginas doradas de la historia de los puentes ferroviarios, que no es sino la que bajo el impulso de la alta velocidad se está escribiendo hoy y ha de escribirse mañana con el mismo espíritu de innovación y superación que ha impregnado hasta nuestros días el progreso de los puentes del tren.

JOSÉ SERNA GARCÍA-CONDE

FOTO PORTADA: PUENTE DEL FIRTH OF FORTH, ESCOCIA. GRAEME OUTERBRIDGE. NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY, 1992

Para la difusión y el progreso de la Ingeniería y la Arquitectura

FUNDACION
ESTEYCO

FUNDACION
ESTEYCO

En mayo de 1991 se constituyó la Fundación Esteyco
con la finalidad de contribuir al progreso
de la ingeniería y de la arquitectura en nuestro país.

La situación de precariedad e incertidumbre
en que se ha estado desenvolviendo la ingeniería española independiente,
ha exigido hasta ahora actitudes básicamente de supervivencia.

El esfuerzo de un creciente colectivo de profesionales
y de órganos de la Administración
ha ido, sin embargo, consolidando un sector cuyos servicios
son considerados indispensables en una sociedad moderna y eficiente.

Es tiempo de pensar en el futuro,
confiando en que no tardará en hacerse presente.

Fomentemos, para ello, un clima propicio para la creatividad,
en el que se exija y se valore el trabajo bien hecho.

Contribuyamos a una sólida formación de los profesionales de la ingeniería,
conscientes de que las organizaciones valen lo que valen sus miembros
y de que en la ingeniería el valor de las personas
se mide por el nivel de sus conocimientos.

Alentemos mejores y más frecuentes colaboraciones interprofesionales,
eliminando fronteras innecesarias.

Reivindiquemos un espacio cualitativamente destacado
de la ingeniería en la sociedad
e impulsemos la evolución de la imperante cultura del hacer
hacia la cultura del hacer pensando.

Consideremos las ingenierías como una prolongación de la Universidad,
en la que se consolida la formación de los jóvenes titulados,
en los años que serán decisivos para su futuro.
Sintámonos involucrados con la Universidad y centros de investigación.

Aseguremos la estabilidad y pervivencia de nuestras organizaciones
y establezcamos los medios para que su vitalidad, garantía de futuro,
no se encuentre lastrada.

Valoremos nuestra independencia, no como un arma contra nadie,
sino fundamentalmente como un atributo intelectual
inherente a quienes tienen por oficio pensar,
informar y decidir libremente.

Javier Rui-Wamba Martija
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Presidente de la Fundación Esteyco

LOS PUENTES DEL TREN

© 2006 Fundación ESTEYCO
© 2006 José Serna García-Conde y Javier Rui-Wamba
Editado por Fundación Esteyco
Impreso en España I.S.B.N.: 84-933553-1-3
Depósito Legal: M-49423-2006
1ª Edición. Diciembre 2006

C O N T E N I D O

JAVIER RUI-WAMBA PRESENTACIÓN 11

JOSÉ SERNA LOS PUENTES DEL TREN

1 LOS PRIMEROS PUENTES DEL TREN

1.1 INTRODUCCIÓN 17

1.2 PUENTES DE PIEDRA 20

1.3 PUENTES DE MADERA 40

1.4 LOS PUENTES DE HIERRO EN SU FASE EXPERIMENTAL 50

2 SEGUNDA MITAD DEL S. XIX. LOS PUENTES DE TREN TIENEN ALMA DE HIERRO

2.1 INTRODUCCIÓN 68

2.2 CELOSÍAS 69

2.3 ARCOS 92

2.4 LOS PUENTES CANTILEVER 110

2.5 LOS PUENTES COLGANTES 122

3 SIGLO XX. LA EDAD DEL ORO DEL HORMIGÓN

3.1 INTRODUCCIÓN 130

3.1 ARCOS DE HORMIGÓN 136

3.3 LOS PUENTE VIGA DE HORMIGÓN Y EL PRETENSADO 154

3.4 EL ACERO EN EL SIGLO XX 178

4 CRITERIOS DE DISEÑO EN LOS PUENTES CONTEMPORÁNEOS

4.1 INTRODUCCIÓN 196

4.2 EL ESQUEMA LONGITUDINAL EN LOS ACTUALES PUENTES DEL TREN 200

4.3 MORFOLOGÍA DE LOS PUENTES DEL TREN CONTEMPORÁNEOS 222

JAVIER RUI-WAMBA UN EPÍLOGO QUE MIRA AL FUTURO 229

A Cris,
Mi puente para el tren de la vida.

Presentación

En tiempos que ahora denominamos medievales, cuando la referencia a la divinidad impregnaba toda la vida social y su influencia –a lo que se decía por entonces–, llegaba a explicar hasta lo inexplicable, existían dos profesiones que, por la trascendencia de sus logros, eran consideradas divinas: la de constructor de fuentes, que hacían manar la vida poniéndola al alcance de todos, y la de constructor de puentes, que rescataban de su aislamiento a pueblos nacidos casi incomunicados.

Hace ya tiempo que el oficio de constructor de fuentes ha desaparecido. Los progresos en la ingeniería del agua han permitido que en casa tengamos multitud de fuentes, a las que designamos con el deplorable nombre de grifos y sobre los que reinan fontaneros y asimilados. El agua pública, el agua de los ingenieros, por la que pagamos poco más de un euro el metro cúbico, ha perdido su prestigio. El agua privada, el agua embotellada, mil veces más costosa, se ha hecho con él. Lo que cuesta, vale. Metáfora de la modernidad.

Pero el oficio de constructor de puentes, aun habiendo perdido su halo de divinidad, está más presente que nunca, porque nunca, en toda la historia de la Humanidad, se han construido tantos puentes como hogaño. El oficio de constructor de puentes está, pues, en pleno auge y es altamente considerado socialmente, aunque, por la clandestinidad con que realiza su trabajo, carezca del brillo mediático de otras profesiones que se ocupan de construir los templos paganos de la modernidad.

En cualquier caso es bien patente que los puentes forman parte del paisaje físico e intelectual de la sociedad del presente. Es unánime el valor funcional que se les atribuye y que –en todos los casos– es su razón de ser. Pero no sólo son obras funcionales. Son, pueden ser, deberían ser, mucho más. A algunos se les considera, fundadamente, obras de arte que humanizan el paisaje. Otros se convierten en símbolo de una época de prosperidad que tras haber alumbrado el "modernismo" y el "post-modernismo" ha derivado, tal vez, en "confusionismo". Pero todos –también los más modestos y desde luego los más desdichados–, son "memoria de quien los construyó", testimonio de la época que les vio nacer y del orden de valores por entonces imperante que actuó, por ello, como comadrona en su alumbramiento.

Lo cierto es que son multitudes las que en su vida diaria utilizan o pasan por debajo –otra forma de uso– de numerosísimos puentes. Sin darse cabal cuenta de ello, despreocupadamente, lo que muestra una confianza bien justificada en su seguridad, atributo que junto a su funcionalidad es el más importante y valorado.

Pero siendo los puentes construcciones tan a la vista y, en ocasiones, tan vistosos, tan utilizados y tan valorados, poco se les conoce. Usamos los puentes y, a veces, los miramos. Pero no siempre los vemos, porque ver es mirar y comprender. Y el puente es testigo privilegiado y testimonio de la época en que se gestó y tiene, bien a la vista, significados profundos que está deseando compartir.

Con los puentes se puede dialogar. Ellos se prestan gustosos a hacerlo, en un lenguaje que aprendieron de los ingenieros y de los artesanos que los gestaron. Y este libro pretende hacerlo con los que nacieron con el tren y para el tren, y compartir tan enriquecedor diálogo, una vez descodificado por el autor, con los lectores y ojeadores de un texto engalanado con imágenes al margen que no son marginales.

El tren es el símbolo de una Revolución Industrial que brotó, en la frontera de los siglos XVIII y XIX, en la puritana y pragmática Inglaterra y se expandió en muy poco tiempo por gran parte de los países de la Tierra. Pero los trenes, con las exigentes geometrías de su trazado, reclamaron la construcción de puentes para cumplir una función: sustentar al tren que acababa de nacer. Aunque la mampostería y la madera, sobre todo en construcciones provisionales, tuvieron su protagonismo, pronto nació una nueva generación de puentes de grandes longitudes y con grandes luces, de los que no existían precedentes en lo que se refiere a sus geometrías, mucho más osadas y, sobre todo, al material con el que se construyeron. En Darby, un pequeño poblado artesano inglés ubicado a orillas del Severn, se desarrolló un sistema para fabricar hierro y después acero en cantidades industriales y con la calidad adecuada para afrontar la enorme demanda creada por la fabricación de material móvil ferroviario, por la necesidad de carriles laminados y por la construcción de puentes de hierro que proliferaron a lo largo de los nuevos trazados. Entonces se inició un capítulo extraordinario de la ingeniería estructural que se extendió durante todo el siglo XIX: "la edad del hierro y del acero estructural", con realizaciones excepcionales, tanto por la geometría de los puentes como por los procedimientos innovadores utilizados en su construcción.

La construcción de estos puentes decimonónicos requirió el desarrollo de nuevas técnicas de análisis estructural o la aplicación generalizada de otras ya disponibles, como la eficiente estática gráfica puesta a punto por ingenieros ilustrados en el siglo XVIII. Tiempo después, con la invención, por artesanos, del hormigón armado, la ralentización por otro lado del impulso ferroviario y la irrupción en todo el mundo, desde sus

orígenes americanos, de la cultura del coche y la construcción de novedosas redes de carreteras crecientemente asfaltadas siguiendo la huella de los antiguos trazados para caminantes y carretas, los puentes metálicos ferroviarios se redujeron en número y los que aún se tuvieron que construir pudieron recurrir, también, al nuevo material, el hormigón armado, que no requería mano de obra especializada que, por otra parte, era abundante y poco costosa.

En el sangriento siglo XX, siglo de guerras que propiciaron la destrucción de puentes –objetivo siempre estratégico de toda guerra– y siglo también de post-guerras, el mundo tuvo que recuperar el aliento antes de ponerse en serio a la tarea de reconstruir y crear nuevas redes de infraestructuras que impulsarían de nuevo el progreso económico y propiciarían transformaciones sociales. Si el hormigón armado ofrecía, por su propia naturaleza, posibilidades limitadas para abordar grandes luces trabajando como dintel –lo que explica la abundancia de puentes en arco de hormigón que se construyeron en la segunda mitad del siglo XX–, la invención por Freysinnet del extraordinario hormigón pretensado y el desarrollo de todas las tecnologías asociadas a este concepto, hicieron posible la construcción de puentes de gran envergadura y dificultad, muy eficientes, con elaborados sistemas constructivos que siempre tenían precedentes en los utilizados en el siglo XIX durante la ejecución de puentes metálicos, pero a los que insuflaron su propia personalidad.

El renacimiento del ferrocarril, que se ha gestado a lomos de la alta velocidad en el ocaso del siglo XX, demanda nuevas líneas que se van extendiendo muy rápidamente, modificando geografías al aproximar ciudades que distando lo mismo hoy están más próximas. Que están configurando nuevas redes de transporte con las grandes urbes como nudos principales, lo que provoca en pocos años transformaciones no sólo físicas sino sociales. Estas nuevas infraestructuras ferroviarias, con trazados muy exigentes que no titubean para evitar un obstáculo físico o abrirse caminos en territorios de geologías complejas, han requerido la construcción de numerosos puentes de gran envergadura y muy exigentes para los que el hormigón pretensado y los aceros moderno, han sido los materiales seleccionados por su eficiencia.

Este libro es, pues, una biografía de los puentes del tren: de los puentes y de sus circunstancias. Es por ello, también, un recorrido por las épocas en las que se construyeron, de manera que el texto aborda asimismo lo que podríamos llamar "sociología de los puentes del tren". Aquí y allá aparecen en las páginas del texto esbozos biográficos de algunos ingenieros, descripciones de hechos ingenieriles, de tecnologías específicas y de puentes emblemáticos que son historia. Para, después, adentrarse en el impresionante presente que vivimos y reflexionar crepuscularmente sobre el futuro de los puentes del tren, identificando cuestiones que están por resolver con claridad y eficiencia,

porque son respuestas a preguntas que son nuevas. Porque los puentes del tren que construimos antaño no son como los que necesitamos hogaño, que no serán tampoco los que servirán a los trenes del porvenir. Y en esta evolución, que no siempre salta a la vista, es donde florecen iniciativas innovadoras, indispensables para que el futuro llegue a hacerse presente.

Pero este libro, protagonizado por los puentes del tren, tiene también por protagonista a su autor, más de lo que suele suceder en cualquier otro libro de carácter, como éste, "biográfico". Porque, creo yo, que su juventud y su competencia le hacen símbolo de una Ingeniería que concibe, proyecta y construye los puentes ferroviarios del futuro, desde una sólida consciencia de lo que fueron los puentes del pasado.

Jose Serna García-Conde es Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Tiene 28 años y desde que concluyó sus estudios en nuestra Escuela de Barcelona, hace casi cinco años, trabaja en Esteyco junto a mí. El azar propició nuestro inicial encuentro que el tiempo ha ido convirtiendo en una sólida relación personal y profesional. Jose, ha concebido, proyectado y vivido la construcción de estructuras muy diversas y, con frecuencia, de notable importancia y dificultad, que colman su "currículum". Ha aprendido, también, con toda naturalidad, que un ingeniero no es un ser aislado que se alimenta sólo de imprescindibles conocimientos técnicos. Un ingeniero es un ser social. Miembro, en primer lugar, de un equipo indispensable, el de nuestra Ingeniería, para llevar a cabo proyectos y direcciones de obras que son, deben ser, muestras de ingeniería colectiva. Miembro también de un colectivo más amplio, el de los Ingenieros de Caminos, pero miembro sobre todo de una Sociedad de seres humanos que tiene que aspirar, aunque no siempre lo parezca, a la convivencia, a la prosperidad material e intelectual, a la solidaridad, para lo que las infraestructuras en las que ha intervenido son también decisivas y serán parte del legado que las generaciones de hoy –y Jose como miembro discreto pero distinguido–, dejará a las generaciones que están aún por nacer. Y en este contexto, Jose Serna, ha podido constatar y practicar, en su día a día, que una de las exigencias más importantes, y más descuidadas en la ingeniería, es la comunicación. Así, por ejemplo, el proyecto de un tramo de una infraestructura, que suele ser eslabón de otras construcciones que completan un itinerario viario o ferroviario, es un documento en el que se define lo que hay que hacer, cómo hacerlo, cuándo hay que hacerlo y cuánto costaría el llevarlo a la práctica. Es, por tanto, la "obra virtual" porque cuando se haga realidad será, en gran medida, como en el proyecto quedó definido. Pero, para ello, hay que comunicar su contenido. Y esta labor de comunicación de contenidos es esencial. Y, con frecuencia, las dificultades en transmitir los contenidos del proyecto están en el origen de las patologías que aparecen en los procesos de contratación, construcción y mantenimiento de una infraestructura.

Jose está convencido de la importancia de la comunicación en su trabajo y, por estarlo, ha ido aprendiendo a comunicarse con claridad, con eficacia y cada vez con mayor elegancia. Y lo aprendido en su práctica profesional le ha permitido escribir este libro con el que se comunica con los lectores, descodificando un diálogo de meses con sus amigos, que ahora lo son más que nunca, los puentes ferroviarios. Aunque no sean los únicos amigos que tiene, que la auténtica amistad nunca es excluyente.

Jose, en su difícil labor –porque adquirir conocimientos y sintetizarlos para comunicarlos es ardua tarea–, nos ha tenido a muchos a su lado. A todos ellos, mi agradecimiento de editor, que es el de Jose también. Y un reconocimiento muy especial para Mercedes López, que siendo desde hace tiempo nuestra amiga, ha sido en esta ocasión, además, la asesora que ha aportado una experiencia riquísima y reconocida, imprescindible para llevar a cabo esta obra. Y que, una vez más, nos ha mostrado sus profundos conocimientos, sus dotes pedagógicas y su curiosidad intelectual. Gracias, Mercedes.

Y así concluye la presentación de un nuevo libro, que cumple también con nuestro objetivo editorial de dar oportunidad a gente joven para participar activamente en la edición de publicaciones de carácter profesional, sin duda, pero que aspiran, además, a despertar la curiosidad y el interés de lectores aparentemente alejados de nuestras actividades ingenieriles, que no lo están, en realidad, porque como usuarios, son su razón de ser.

JAVIER RUI-WAMBA

George Stephenson (1781-1848).
Robert Stephenson (1803-1859).
Isambard Kingdom Brunel (1806-1859)

1. Los primeros puentes del tren

1.1 Introducción

En la primera mitad del s. XVIII era ya muy frecuente emplear vagones sobre raíles para transportar cargas, sobre todo en la minería. Suele considerarse que el primer puente construido para soportar el paso de una vía fue el Causy Arch inglés, levantado en 1721 en el condado de Durham, aunque todos los vagones que circularon por este puente o cualquier otro en los siguientes 100 años lo hicieron arrastrados por caballos.

Los puentes no tuvieron que dar paso al ferrocarril propiamente dicho hasta 1825, año en que las primeras locomotoras de vapor empezaron a transportar cargas entre las localidades mineras de Stockton y Darlington, en Inglaterra. El éxito de esta línea primigénea llevó a la apertura, en 1830, del trayecto entre Manchester y Liverpool para mercancías y viajeros en lo que habitualmente se considera el nacimiento del ferrocarril tal y como hoy lo conocemos.

Este hito marca el inicio del que probablemente sea el periodo más prolífico, exigente e innovador en el desarrollo y construcción de puentes: la era del ferrocarril. Fruto fundamentalmente del gran salto que supuso el ferrocarril en las exigencias del trazado y en las cargas a resistir, los ingenieros y constructores de puentes que vivieron el despertar de esta era tuvieron que enfrentarse a nuevos y exigentes retos con pocos o nulos precedentes como guía y con la innovación y el riesgo como necesarios compañeros de trayecto.

Hablar de los inicios del ferrocarril supone inevitablemente hablar de las Islas Británicas donde, padre e hijo, George y Robert Stephenson, y el contemporáneo del segundo Isambard Kingdom Brunel son los ingenieros cuyos logros destacan en el magnífico legado ingenieril que las primeras décadas del ferrocarril nos dejaron.

En un momento en el que la presión de la especialización suele rondar a los ingenieros, rememorar la amplitud y diversidad del trabajo de estos pioneros de la ingeniería supone un reto y un estímulo. A menudo sin una base de conocimiento establecida y con muy limitadas herramientas, no sólo diseñaron y construyeron una inmensa variedad de puentes, con materiales, técnicas y tipologías tremendamente diversas y no pocas veces novedosas, sino que eran los encargados de la ingeniería de líneas completas. De ellos dependían desde el trazado y el tipo y ancho de vía, pasando por los túneles, puentes y estaciones, hasta las propias locomotoras en el caso de los Stephenson o, cambiando de campo, los avanzados buques a vapor que diseñó Brunel.

Reproducción de la locomotora Rocket creada por George Stephenson (1829)
Locomotora del AVE (2005)
Si como ha ocurrido desde 1830 con el nacimiento del ferrocarril, cada medio siglo la velocidad de los trenes aproximadamente se duplica (30 km/h en 1830, 60 km/h en 1880, 120 km/h en 1930 y 240 km/h en 1980) cabría esperar que en el 2030 los trenes más rápidos viajen a 500 km/h y que a finales de siglo alcancen la velocidad de los actuales aviones de pasajeros.

[1] Citado por J. J. Arenas en "El puente, pieza esencial del mundo humanizado". Universidad de Santander, 1982.

Si el ferrocarril tiene un padre, éste es sin duda George Stephenson. En 1814, con la intención de facilitar el trabajo en una mina, Stephenson construyó su primera locomotora que gradualmente iría mejorando hasta que en 1825 su diseño bautizado como "Locomotion" transportó en la línea Stockton-Darlington cargas que superaban las que el mejor equipo de caballos podría arrastrar. Su consagración definitiva llegó en los "Rainhill Trials" de 1829, competición organizada por la "Liverpool and Manchester Company" para elegir la mejor locomotora para esta primera línea. Juzgada en un principio en exceso ambiciosa por exigir una velocidad media mínima de 16 km/h para la participación, el clamor popular explotó cuando la locomotora "Rocket" de Stephenson alcanzó lo considerado inalcanzable, 30 km/h, para alzarse con la victoria. Sobre ello The Scotsman escribió: *"…ha establecido las bases para dar a nuestra civilización un impulso superior al que haya recibido de cualquier otro avance desde que la imprenta abrió las puertas del conocimiento a la humanidad"*[1].

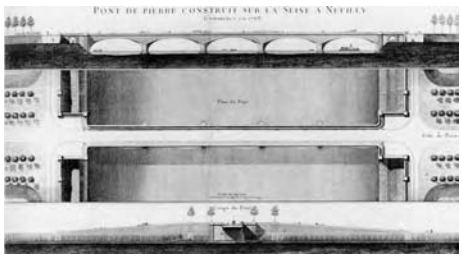
George Stephenson, ya siempre flanqueado por su hijo Robert que con 27 años iba tomando su relevo, fue nombrado ingeniero de la primera línea de ferrocarril Manchester-Liverpool, que con una longitud de 48 km suponía una empresa abrumadora para la época. Las exigencias en cuanto al trazado de la vía, con pendientes pequeñas y radios grandes en las curvas, hacían inevitable que ésta tendiese con frecuencia a despegarse del terreno; si muchas de las más brillantes carreras de anteriores maestros en la construcción de puentes terminaron con un número limitado de puentes en su haber, los ingenieros del ferrocarril, en cambio, se vieron inevitablemente abocados a construir varias decenas de ellos en muy poco tiempo con cada nueva línea. Sólo en la primera entre Manchester y Liverpool a cargo de los Stephenson fueron necesarios 63 puentes. En las líneas asociadas al "Great Western Railway" a cargo de Brunel e iniciadas en la misma década se construyeron otros varios cientos, muchos de los cuales diseño él mismo con la originalidad y falta de convencionalismo que caracterizaron sus grandes obras. También destacable aunque menos conocido resulta el trabajo de Joseph Locke (1805-1860) en los numerosos puentes de su primera línea del "Grand Junction Railway" que data de 1837.

En conjunto, durante las tres décadas que siguieron al inicio del ferrocarril se tendieron únicamente en Gran Bretaña en torno a 14.500 km de vías y se construyeron alrededor de 25.000 puentes, lo que supone una media de 16 puentes a la semana. Esto puede dar una idea de por qué se ha llegado a decir que de todos los productos de la revolución industrial ninguno dejó su huella en el paisaje de Gran Bretaña o afectó a la vida de los británicos tanto como el ferrocarril.

Si bien el inicio de los puentes metálicos que habrían de acabar siendo el símbolo de la infraestructura ferroviaria es ligeramente anterior al nacimiento del propio ferrocarril, en los primeros compases de la era del tren la construcción con el hierro se encontraba todavía en fase experimental y sus ejemplos en las primeras líneas, aunque relevantes y valiosos como veremos, son contados. La amplia mayoría, por tanto, de los varios millares de obras de paso que se construyeron en esta primera época se solucionaron con técnicas establecidas: puentes arco de piedra o fábrica y soluciones en madera de carácter más provisional.

En cualquier caso el ferrocarril empezó rápidamente a demandar soluciones no sólo más adecuadas a las mayores exigencias en el trazado y en la carga a soportar, sino también más rápidas y económicas, espoleando así una rica época de experimentación durante el segundo tercio del siglo XIX en la que tipologías tradicionales y novedosas convivieron empleando los tres materiales conocidos para la construcción: la piedra o fábrica, la madera y el pujante y prometedor hierro. Tres materiales que configuran otros tantos apartados del presente capítulo dedicado a los primeros puentes del tren.

La rigidez de los trazados ferroviarios lleva a un gran número de puentes y viaductos. Los 4 viaductos de Morez, en la línea francesa Nyon-Saint Cergue-Morez.
Línea ferroviaria de Semmering, primera trazada en un sistema montañoso (Alemania, 1848-54)



Puente romano de Alcántara, Cáceres (año 105-106). Puente románico de La Reina, Navarra (siglo XI). Puente de Carlos, Praga (1357). Pont Neuf, París (1606). Puente de Neully, obra de Perronet (1776).

1.2 Puentes de Piedra

Antecedentes en la construcción con piedra

Probablemente los primeros en utilizar el arco como tipología estructural fueron los chinos más de 20 siglos a.C. Los romanos, por supuesto, también hicieron un uso prolífico del arco aunque los primeros puentes romanos no llegaron hasta el s. II a.C. Los arcos romanos eran en general semicirculares apoyados en pilas de gran anchura, de hasta 1/3 ó 1/2 de la luz. De hecho puede decirse que los puentes multiarco romanos no trabajaban como tales, sino como una sucesión de puentes de un sólo vano apoyados en la enorme robustez de las pilas y por lo tanto estables aún sin los arcos vecinos.

Podía ser ésta una forma inteligente con la que los romanos minimizaban el efecto del derrumbe de algún arco tras una riada o por un derribo intencionado para cortar el puente en tiempos de guerra; en uno u otro caso la caída de un vano no arrastraba al resto de la estructura facilitando en gran medida su posterior reconstrucción. El uso de pilas tan anchas implicaba también facilidades constructivas, pudiendo cimbrarse el puente vano a vano. Sin embargo unas pilas de tal magnitud suponían un gran obstáculo al paso natural del agua bajo el puente que por tanto sufría bajo la acción socavante de las riadas que han sido sin duda la mayor causa de colapso de estas estructuras.

Después de la época romana, el arte de la construcción de puentes arco cayó en el olvido durante toda la alta edad media hasta el siglo XII, momento en que resurgió bajo la influencia de la iglesia y con motivo de las numerosas peregrinaciones. Con el Renacimiento, se infundió una nueva corriente en el diseño de estos puentes con la aparición de los puentes rebajados y de curvatura variable que se aproximaban más a la curva antifunicular de las cargas. Las luces fueron creciendo aunque manteniendo siempre pilas de gran anchura, no menor que 1/6 de la luz.

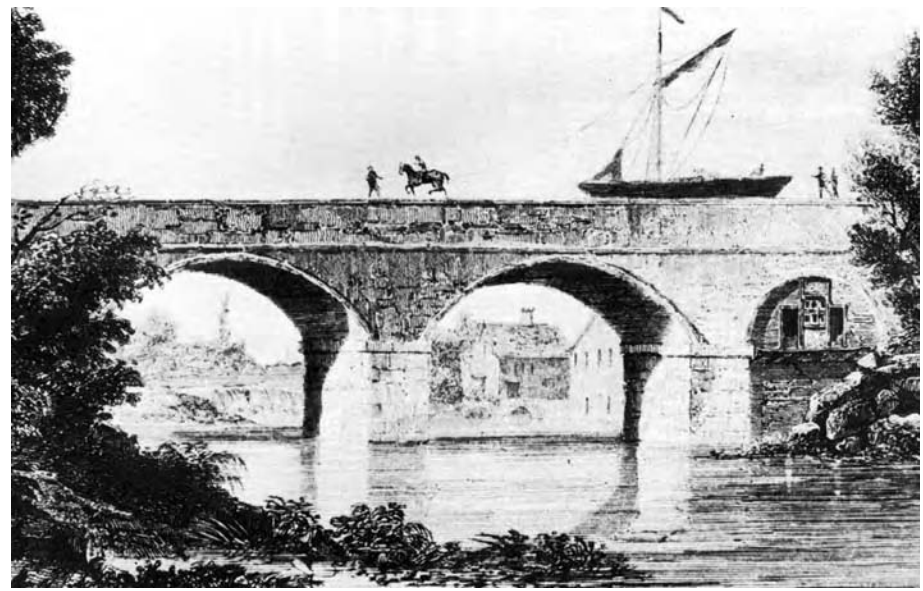
Entre los siglos XVI y XVIII fueron los constructores franceses los más prolíficos y avanzados en el diseño y construcción de puentes arco de obra de fábrica y fue con la aparición de Jean-Rodolphe Perronet, a mediados del s. XVIII, cuando se produjeron cambios sustanciales en su diseño y construcción. Este gran ingeniero francés, primer director en 1747 de la pionera École de Ponts et Chausées de París, intuyó y demostró el equilibrio de esfuerzos horizontales que existe entre bóvedas consecutivas en estos puentes e introdujo la idea de cimbrar y construir todos los arcos a la vez.

Al compensarse en todo momento el empuje horizontal de un arco con el del vecino, las pilas tan sólo debían resistir esfuerzos verticales y podían ganar en esbeltez al mismo tiempo que se aumentaba significativamente el peralte o rebaje de los arcos. Relaciones luz/flecha de 6 eran habituales, aunque Perronet alcanzó valores de hasta 11. Las pilas pasaron a tener un ancho no superior en muchas ocasiones a 1/9 ó 1/10 de la luz. Esto no sólo reducía el volumen de construcción en una solución de mayor elegancia y significado ingenieril, sino que daba lugar a obras mucho más durables al reducir significativamente el obstáculo que para el paso natural del agua suponían. Por otro lado, el descimbrado de todo el puente debía ser simultáneo y pasó a ser la operación más delicada en su construcción, constituyendo, en numerosos casos, un auténtico acontecimiento social.

La segunda mitad del s. XVIII puede considerarse como la de la escisión del ingeniero civil que pasaría a ocupar el lugar del arquitecto en la construcción de puentes. Principalmente en Francia se fueron estableciendo bases de conocimiento que cimentaron la sistematización de técnicas cada vez más especializadas y gradualmente el "arte de la buena práctica" fue evolucionando hacia "la ciencia de la construcción". La técnica desarrollada en este periodo permitió salvar en varios casos luces de hasta 40 m, como en el puente de Neuilly construido por Perronet sobre el Sena en 1774, y no tardó en extenderse desde Francia a los países de su entorno. Algunas de las más sobresalientes realizaciones se dieron a finales del s. XVIII y principios del s. XIX en Gran Bretaña en el contexto de la breve pero fructífera "era de los canales", que eran las arterias que nutrían de carbón los incipientes centros industriales.

Los canales proporcionaron los más claros antecedentes de los viaductos de piedra para el ferrocarril. El viaducto de Chirk (1848) junto al acueducto de Telford en Canal de Llangollen.

Probablemente estos canales y no las carreteras fuesen el antecedente más valioso para el ferrocarril en lo que a la construcción de puentes se refiere, pues el agua es, como las vías, reticente a viajar con giros bruscos y, sobre todo, con pendientes pronunciadas. Las carreteras y sus carretas, en cambio, podían adaptarse al terreno y descender zigzagueantes al fondo de los valles para buscar los pasos más cortos y sencillos sobre los cauces. Así pues, los precedentes más similares a los grandes viaductos de ferrocarril habría que buscarlos en los magníficos acueductos que los canales exigieron. Esto es cierto en cuanto a morfología que no en cuanto a robustez, pues la carga del agua tendía claro está a ser más uniforme y estática que la que habrían de soportar los puentes bajo el paso de las pesadas locomotoras. La época dorada de los canales que se dio en los albores de la revolución industrial fue en cualquier caso breve pues el inminente ferrocarril no tardaría en desplazarlos como principal forma de transporte terrestre. De hecho, fueron precisamente los hombres que habían trabajado en la construcción de canales en Gran Bretaña, los "navvies", los que el ferrocarril reclutó para la cons-

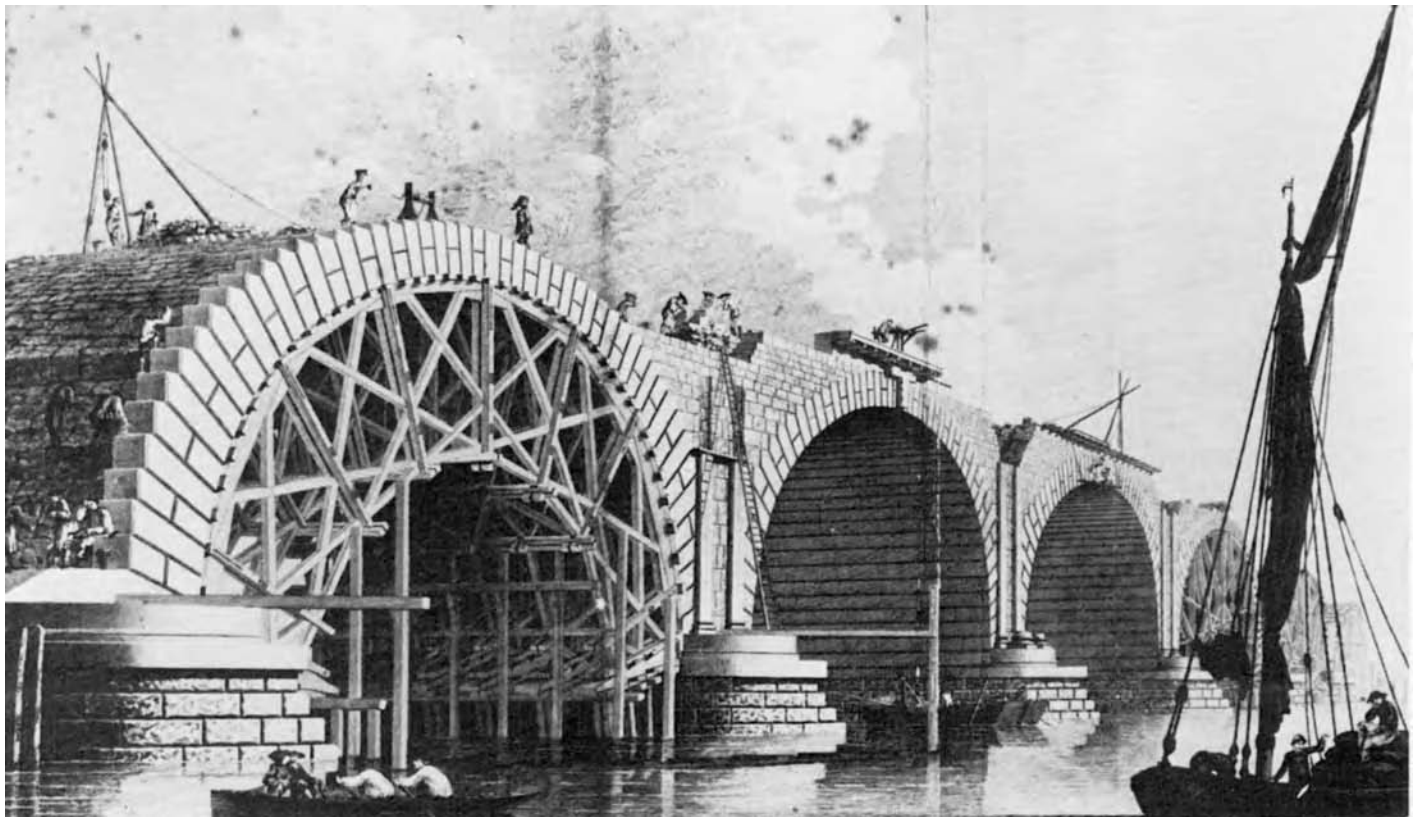


John Rennie (1761-1821).
Thomas Telford (1757-1829).
El acueducto de Barton, construido por Brindley en 1761, condujo el primer canal industrial británico a través del río Irwell en Lancashire.

trucción de las primeras líneas aprovechando una experiencia consolidada en el siglo XVIII.

John Rennie y Thomas Telford (1757-1829), a menudo considerado el padre de la ingeniería civil tal y como hoy la conocemos, son las figuras británicas que sobresalieron en la Ingeniería de principios del siglo XIX y ambos construyeron, con los precedentes franceses como guía, importantes arcos de piedra.

Rennie, reconocido por sus construcciones de muelles, canales o faros además de sus puentes, es particularmente recordado por sus arcos de piedra sobre el Támesis en Londres y en particular el "New London Bridge" terminado en 1831. Thomas Telford es un ejemplo todavía más paradigmático del ingeniero (aunque en su época tal título no era oficial en Inglaterra) cuya obra deja pocos campos intactos en el ámbito de la obra civil. Desde los grandes canales con sus numerosos acueductos, pasando por esclusas y puertos, hasta las carreteras y sus puentes de los que construyó muchas decenas. El puente de Dean en Edimburgo, con pilas de 40 metros de altura o el de Over, sobre el Severn en Gloucester, con 45 metros de luz, son algunos ejemplos de puentes de piedra destacados de su extensa obra que se desarrolló principalmente en Escocia.



Construcción del viaducto de Blackfriars, proyecto de Mylne (1776).
El New London Bridge de John Rennie (1820).

Un aspecto significativo, sin embargo, diferenció a estos grandes maestros británicos en la construcción con piedra de sus inmediatos predecesores continentales: pudieron empezar a considerar el hierro como una alternativa viable para sus obras comenzando a explotar sus ventajosas cualidades resistentes. Rennie y en particular Telford, con sus magníficos arcos de fundición y, por supuesto, el primer gran puente colgante sobre el estrecho de Menai (1826), encabezaron la primera generación de ingenieros dominadores del hierro que en sus últimos días vio la fulgurante aparición del ferrocarril. Al tratar con este entonces novedoso material habrán por tanto de volver a aparecer sus destacadas figuras, con las que se iniciaba la hegemonía que a lo largo de buena parte del siglo XIX mantendría la ingeniería británica en la construcción de puentes, impulsada por la revolución industrial y su modo de transporte: el tren.

Viaducto de Barentin, en la línea Paris-Havre, 1844. Viaductos ferroviarios en Chapel-en-le-Frith, Derbyshire. Viaducto en la pionera línea continental de Semmering (1854).
(pag. derecha) Viaducto de Sankey, en la línea Manchester-Liverpool (1830).

La piedra o fábrica en los puentes del tren

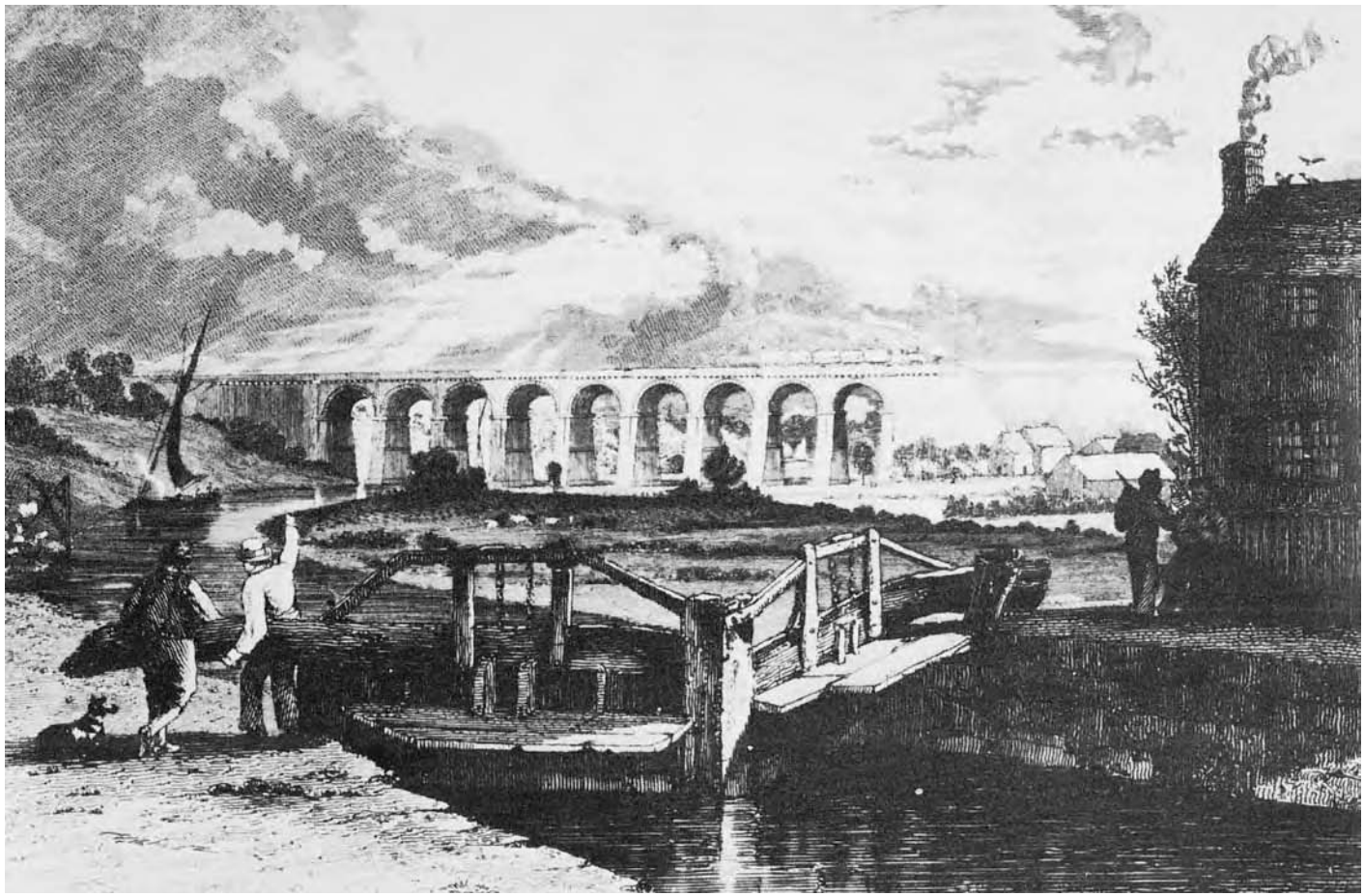
Las primeras líneas de ferrocarril de la primera mitad del siglo XIX encontraron un panorama de la tecnología de construcción de puentes en el que la piedra se mantenía como el material de referencia, aunque cumplía ya sus últimos años como tal, pues el hierro empezaba firme su imparable andadura.

La madera se usaba con gran frecuencia por la rapidez, sencillez y economía de construcción que permitía, pero se le atribuía, no sin justificación, un cierto carácter de provisionalidad y menor robustez en comparación con la piedra, por lo que se tendía a descartarla para las obras de mayor importancia. Por otro lado, la experiencia con el pujante hierro era valiosa y prometedora, pero todavía limitada y, pese a ser la construcción de arcos de piedra lenta y costosa, el hierro tardaría un tiempo en afianzarse como material de solvencia técnica y económica contrastada y pasar a acaparar la construcción de puentes de ferrocarril.

La técnica en la construcción de arcos de piedra, en cambio, había experimentado importantes progresos en el siglo anterior, estaba bien establecida y, siendo en general su capacidad y robustez reales superiores a las que requerían las cargas de los antiguos caminos y calzadas, su diseño y técnicas de construcción no requirieron ningún cambio cualitativo para adaptarse a las mayores exigencias del ferrocarril.

En efecto, la mayor parte de la carga que deben resistir los puentes de piedra corresponde a su peso propio y por lo tanto el gran incremento de carga variable que suponía el tren no implicaba una variación drástica de la carga total como sucedía en los arcos de madera o fundición, mucho más ligeros. Esto es especialmente importante en un arco, forma estructural que por entonces acaparaba la construcción de puentes, en el que son las cargas variables no uniformes las que más tienden a alejar la curva de presiones de la directriz del arco, provocando flexiones y alejando por tanto a la estructura de su funcionamiento óptimo. Este efecto es lógicamente más importante cuanto mayor es la carga variable en relación a la carga total, de ahí que con los pesados arcos de piedra se lograse minimizar.

Así pues, no es de extrañar que en estos primeros años se construyesen este tipo de puentes por millares. Incluso con el desarrollo de la siderurgia y el retroceso gradual de la piedra como material para la construcción de puentes, grandes viaductos de piedra se han seguido levantando a lo largo de todo el siglo XIX y, aunque desde principios del siglo XX, su construcción se ha abandonado prácticamente por completo, son todavía muy numerosos los que siguen y seguirán dando servicio a nuestras líneas.



Viaducto de Sankey, obra de George Stephenson (1830).
Royal Border Bridge, el mayor viaducto de piedra construido por Robert Stephenson (Londres-Edimburgo, 1850)

Actualmente, en España más de una tercera parte de los puentes de la red ferroviaria son puentes arco de fábrica (piedra, ladrillo u hormigón en masa). El porcentaje de este tipo estructural aumenta en las comunidades que tradicionalmente han tenido un mayor y más temprano desarrollo económico y donde por lo tanto más kilómetros de línea se tendieron previamente a la consolidación definitiva de los puentes metálicos. El ejemplo más claro, en consecuencia, hay que buscarlo en las Islas Británicas, donde según el Transport Research Laboratory se estima que existen cerca de 40.000 arcos de fábrica, 33.000 de los cuales pertenecen a la red ferroviaria, que tiene en total algo menos de 70.000 puentes.

Lógicamente, la mayor parte de estos millares de puentes son obras de paso menores, pero ya las primeras líneas nos dejaron magníficos ejemplos de los nuevos viaductos de piedra de gran longitud y altura que traería el ferrocarril. Éstos alcanzarían, como veremos, su máxima expresión en la Europa continental donde la orografía era más exigente que en las Islas Británicas y donde el empleo de la piedra en los grandes puentes se extendió durante más tiempo.

Un ejemplo temprano de estos puentes lo encontramos ya en la línea entre Manchester y Liverpool, abierta en 1830. Obra de los Stephenson, el viaducto de Sankey cruza el canal de St. Helens y es con sus nueve arcos de 15 metros de luz y sus más de 20 metros de altura el primer gran viaducto de ferrocarril. Muestra de la robustez y durabilidad de estas soluciones es el que este primer viaducto, como tantos otros posteriores, siga en servicio hoy, aunque su línea visual se haya visto alterada, probablemente no para bien, por la catenaria de electrificación superior.

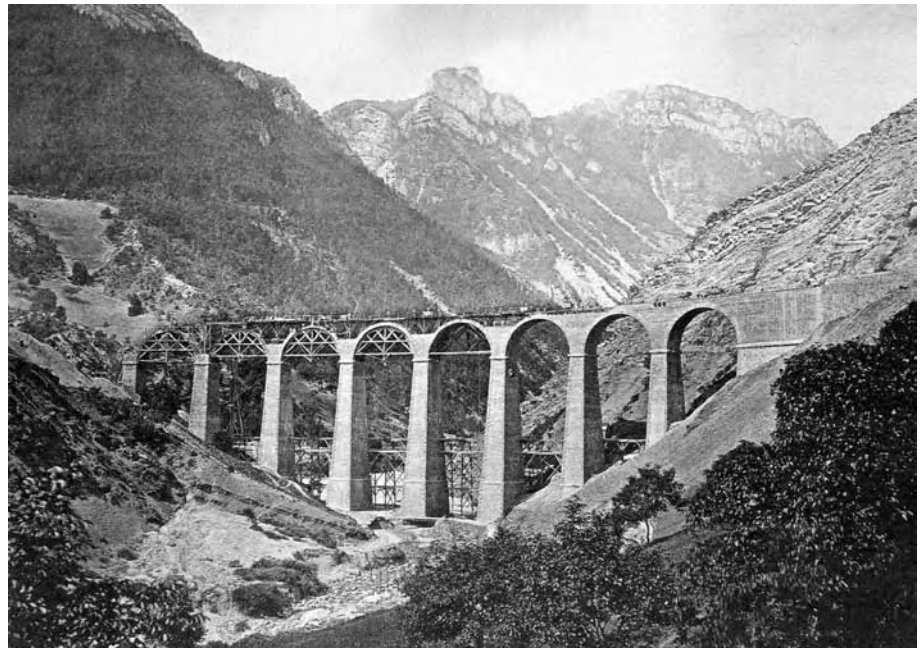
Posiblemente el viaducto de piedra de mayor importancia que construyó Robert Stephenson sea el Royal Border Bridge sobre el río Tweed que completó la línea entre Londres y Edimburgo en 1850. Sus 28 arcos de 18.5 metros de luz se construyeron en menos de 3 años con una punta de 2.700 trabajadores en la obra y lo convirtieron en el viaducto de piedra más largo de Gran Bretaña. Sin haberse modificado desde su construcción, también esta obra sigue hoy soportando el paso de trenes cuyas características exceden en mucho los sueños más descabellados de sus constructores.

Es destacable la mayor anchura de una de las pilas centrales, probablemente como consecuencia de dos fases de cimbrado durante la construcción del puente. El resto de pilas, con un ancho no superior al sexto de la luz y más de 35 m de altura, podrían no ser capaces de soportar el empuje lateral de un arco que por lo tanto debe en todo momento estar contrarrestado por el empuje del arco vecino. Ello obliga a construir todos los arcos a la vez para descimbrarlos simultáneamente, lo que multiplica el número de las costosas cimbras, haciendo aconsejable en ocasiones dejar pilas inter-

medias anchas para construir en varias fases reaprovechando las cimbras. Estas pilas anchas, capaces de soportar el empuje descompensado de un arco, son por otro lado un seguro para que un posible fallo en un vano no arrastre al colapso a la totalidad del viaducto.

Los viaductos más altos se han resuelto tradicionalmente con arcos poco rebajados, con frecuencia semicirculares, pues en estos casos la mayor flecha del arco incrementa poco el volumen de piedra y no afecta a la cota de la rasante, aspectos que con frecuencia han sido un motivo para rebajar todo lo posible el arco de los puentes de menor longitud y altura. Una mayor relación flecha-luz, además, reduce los empujes horizontales de los arcos lo que puede posibilitar una construcción evolutiva sin necesidad de pilas anchas como la del Royal Border Bridge. En estos casos es característica una geometría de las pilas con un espesor que crece apreciablemente de la cabeza a la base.

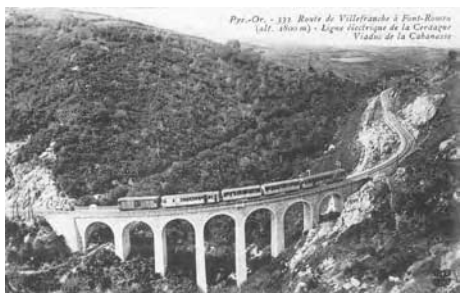
Viaducto de Boixadell (Zaragoza-Barcelona, 1859) y de Royal Border (Londres-Edimburgo, 1850), ambos con una pila de rigidez incrementada. Construcción del viaducto francés St. Michel por arcos sucesivos (1877).



Por supuesto, en muchas otras ocasiones sí ha resultado ventajoso aumentar el rebaje del arco, aspecto que fue llevado a su extremo por, no podía ser otro, Isambard Kingdom Brunel. El ejemplo más claro es el puente de Maidenhead de 1839, que salva el ancho cauce del Támesis en una de las líneas del Great Western Railway. La construcción de esta magnífica obra fue polémica incluso en la propia decisión de cual habría de ser su emplazamiento. Mientras muchos sugerían apuntar hacía un estrechamiento del cauce, Brunel optó por cruzar en un punto donde la longitud a salvar era de 90 metros, pero que contaba con una isleta convenientemente situada en su parte central. Buen conocedor de la dificultad y riesgo de cimentar las pilas en el cauce, Brunel aceptaría el reto estructural de apoyar sólo en los márgenes y la isleta central, salvando así el cauce con sólo dos vanos, de hasta 39 metros de luz, y sin que ello afectase en demasía a la cota de la rasante. Para ello Brunel diseñó los arcos de ladrillo más largos y con mucho los más rebajados que se hubiesen construido, manteniendo la rasante a menos de 12 metros de la cota de agua. Su plazo de construcción, de sólo 20 meses, fue igualmente asombroso para la época.

Los críticos de Brunel, que su falta de convencionalismo hacía florecer y que el tiempo se encargaría de acallar, predijeron que un tal diseño, que desafiaba las leyes establecidas de la ingeniería tantas veces empleadas, sucumbiría en cuanto se retirase la cimbra. Huelga decir que no fue así y el de Maidenhead es otro de los primeros puentes de ferrocarril que hoy siguen en servicio. En 1893 se amplió con un puente adosado idéntico para pasar de 2 a 4 vías cuyo plazo de construcción superó en 12 meses al del puente original. Hoy sigue siendo el puente arco de ladrillo de mayor luz y rebaje del mundo.

Viaductos de I. K. Brunel en el Great Western Railway. Viaducto de Wooton-Basset, y fotografía y grabado del puente de Maidenhead (1839).

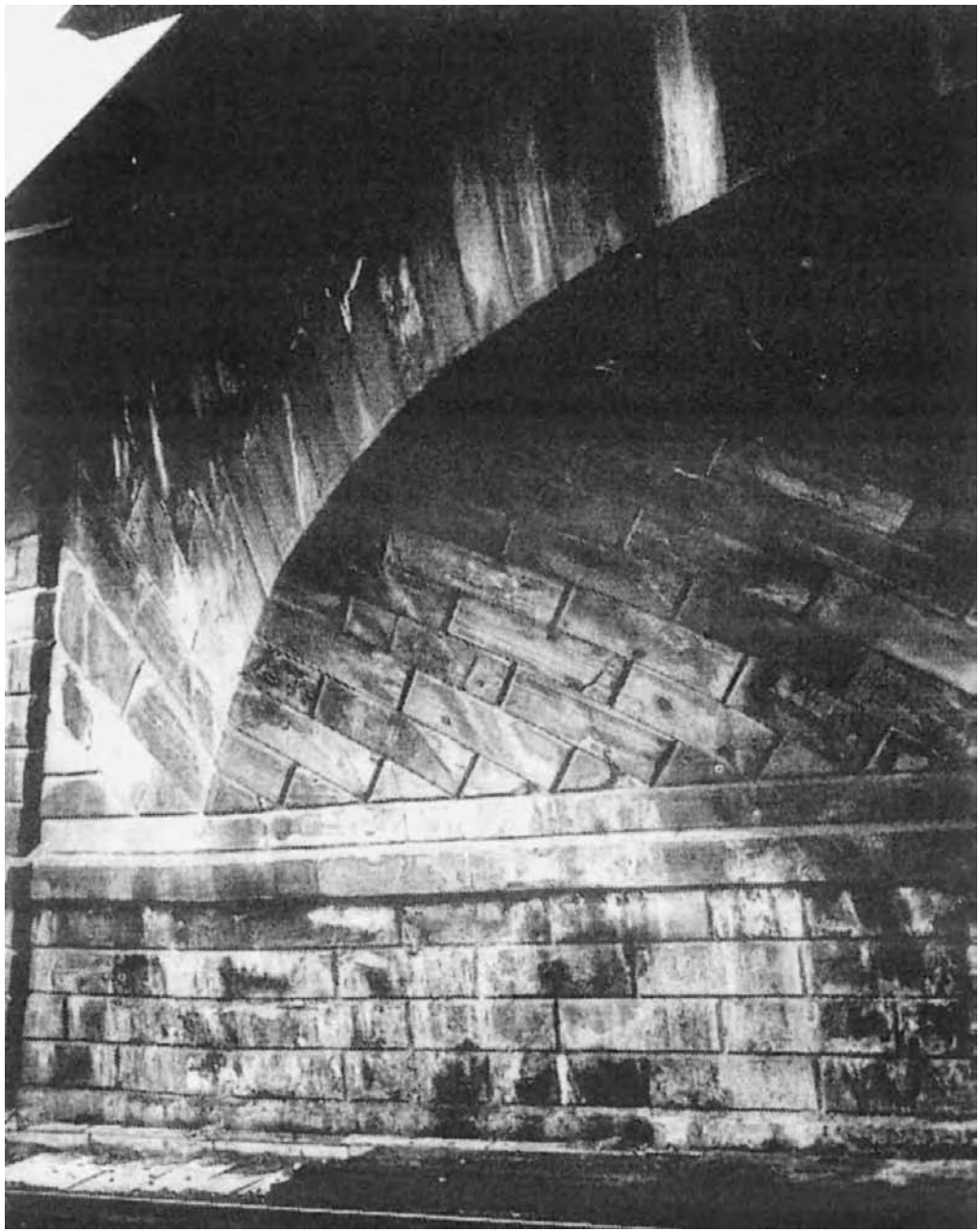


Con el ferrocarril proliferaron los viaductos en curva y esviados. Viaducto de Aix-en-Provence, en la línea a Marsella. Viaducto de Cabanasse, en los pirineos orientales. Viaducto de London-Greenwhich (1836), el más largo viaducto de piedra nunca construido.
(pag. siguiente) Configuración inclinada de las hiladas en el puente esviado de Rainhill (Manchester-Liverpool, 1830).

Además de llevar los tradicionales puentes de piedra o fábrica a mayores alturas, longitudes y luces, el ferrocarril condujo también a importantes avances en la estereotomía o el tallado de los sillares para los puentes. Esto fue consecuencia de la construcción de varios puentes en curva pero, sobre todo, de la proliferación de puentes esviados. Sólo en la originaria línea entre Liverpool y Manchester se contabilizaron 16. Hasta la llegada del ferrocarril, las carreteras y los caminos se reviraban para buscar generalmente un cruce perpendicular y por lo tanto más corto sobre el cauce u obstáculo a salvar; pero para el tren esto dejó con frecuencia de ser posible. Ya no era el puente el que condicionaba al camino, sino el camino el que condicionaba al puente.

El esviaje enfrentaba dos objetivos: el constructivo de que los sillares pudiesen ser idénticos y situarse en hiladas horizontales y paralelas a la línea del estribo, y el estructural de que el plano de la junta entre sillares o dovelas estuviese sólo sometido a compresión, esto es, que se mantuviese perpendicular a la curva de presiones. En un puente esviado la curva de presiones está en un plano paralelo al eje de la vía y no es por tanto perpendicular a la línea de estribos. Mantener la disposición tradicional de dovelas en hiladas paralelas a los estribos implicaba por tanto aceptar que las compresiones no fuesen perpendiculares a la junta y llevaba al riesgo de que a partir de cierto ángulo de esviaje se pudiesen producir deslizamientos entre dovelas.

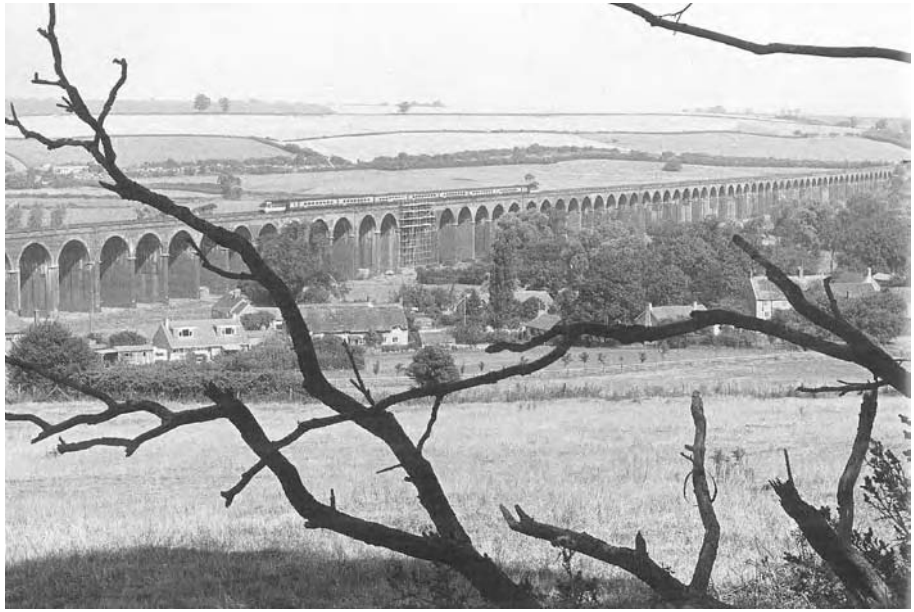
Este problema fue resuelto en 1789 por el irlandés William Chapman, quien situó por primera vez los planos entre dovelas inclinados de forma que quedasen a 90º de la curva de presiones. Esto complicaba significativamente la geometría y disposición de las dovelas tanto en el arco como en los tímpanos. Chapman se enfrentó al problema durante la construcción del canal de Kildare. Los canales, como se ha comentado, tienen también mayores exigencias de trazado que las carreteras y ello llevó a algunos pasos esviados, si bien estos procuraban evitarse y no llegaron en gran número hasta la entrada en escena del tren. Entre 1830 y 1840 la literatura sobre esta cuestión proliferaba, aunque tras las numerosas realizaciones en las primeras líneas el problema se dio definitivamente por resuelto. Algunas de las primeras y más destacadas soluciones fueron inevitablemente obra de los Stephenson, como en los puentes de Rainhill o Irwell en la línea Manchester-Liverpool de 1830.



Viaductos ferroviarios de piedra en Inglaterra. Victoria Bridge, en la línea Penshaw-Wear (1838). London Road Viaduct en Brighton (1841). Saddleworth Viaduct sobre río Tame en la línea Manchester-Huddersfield (1849).

Harringworth Viaduct, uno de los más largos viaductos de piedra del país, cruzando el río Welland (1879).

En las siguientes décadas Gran Bretaña vería aparecer viaductos de piedra o fábrica de una luz, altura y longitud como poco antes nadie hubiera imaginado. Los de Victoria (1838), London Road (1846), Stockport (1847) o Sadleworth (1849), todos de la primera mitad de siglo, fueron algunos de los más notables. También destacable es el de Harringworth, ya de 1879, que alcanzó una longitud de 1.165 metros, lo que hubiese supuesto un gran récord de no ser por el excepcional viaducto de la línea London-Greenwich que se había completado en 1836, más de 4 décadas antes. Esta línea discurría a 7 metros del suelo sobre un extraordinario viaducto de 878 arcos de ladrillo con una asombrosa longitud total de 6 kilómetros. Con él se buscaba evitar la necesidad de innumerables cruces a nivel en una zona muy poblada, lo que probó ser una decisión acertada pues con los años se poblaría mucho más. Algunos de sus arcos han exigido reparaciones o ampliaciones, pero en general el comportamiento del puente ha sido adecuado y hoy, 170 años después de su construcción, sigue en servicio como el que es, con mucho, el puente de piedra o fabrica más largo del mundo.



Los viaductos de piedra más sobresalientes, sin embargo, se levantarían en la Europa continental. El ferrocarril francés, que avanzaba sólo unos años por detrás del referente británico, tuvo que enfrentarse a una orografía con frecuencia más abrupta que la de las islas y fue en este país donde los viaductos de piedra de gran altura y longitud alcanzaron su mayor expresión. En ello pudo influir un desarrollo de la industria de la siderurgia no tan rápido como el británico, pero sin duda también la tradición y el dominio francés en la construcción de puentes de piedra, impronta de Perronet, que llevó a que el empleo de esta tipología para las grandes obras se prolongase más tiempo.

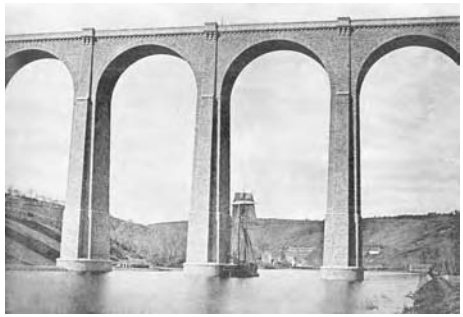
Posiblemente el primer ejemplo de los grandes viaductos de piedra franceses sea el de Val-Fleury de 1840, que con 145 metros de longitud y una altura máxima de 32 metros formaba parte de una de las primeras líneas, entre Paris y Versalles.

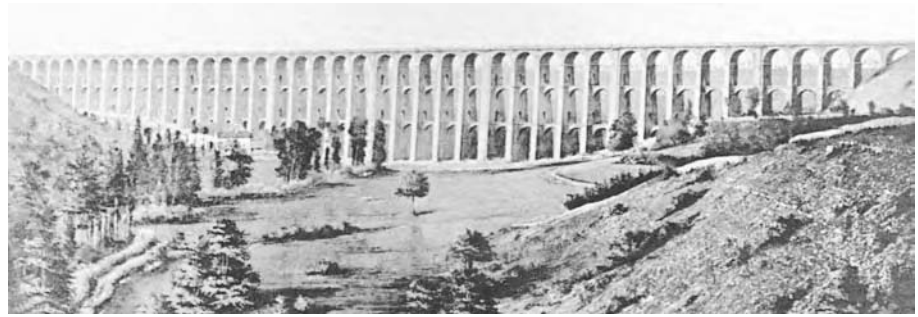
Fueron muchos y destacados los que le siguieron. Algunos de los mayores y mas conocidos son el viaducto de Barentin (Paris-Havre, 1844) con 480 metros de longitud, 33 metros de altura y arcos de 15 metros en curva, o el de Mirville de 507 metros y de la misma línea.

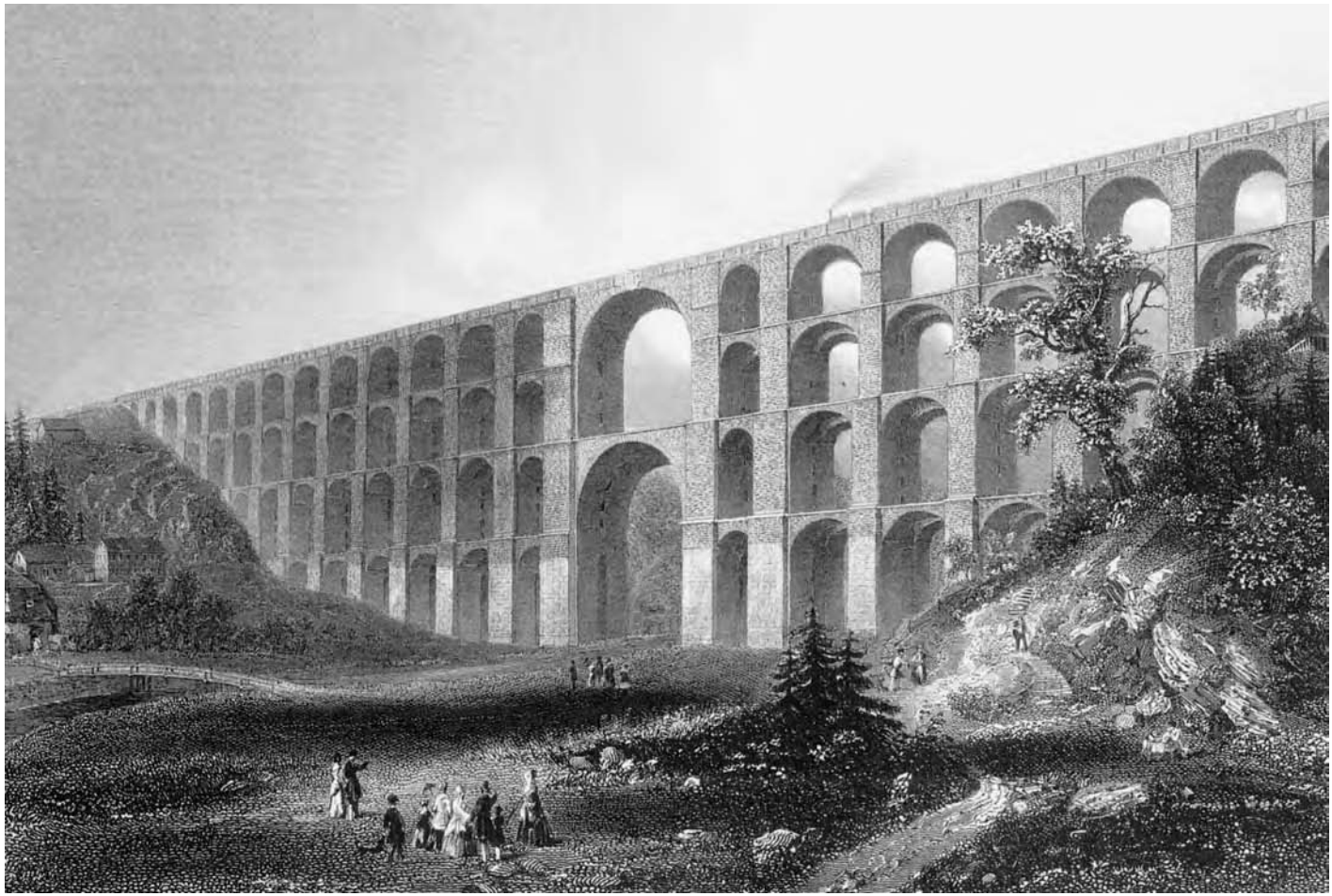
Entrando ya en la segunda mitad del siglo XIX, en 1856 se levantaría para la línea Paris-Bale el imponente viaducto de Chaumont, de 600 metros de longitud y pilas que con una altura de hasta 50 metros incorporaban arcos de arriostramiento intermedios. El viaducto que desde 1860 domina la localidad de Morlaix alcanzó los 62 metros de altura ya con un solo nivel de arriostramiento. Estos arcos intermedios, de los que el viaducto de Goltzsch (1851) en Alemania llegó a incorporar 4 niveles a lo largo de sus casi 80 metros de altura, acabarían por abandonarse también en los viaductos más altos. Esto realzó más si cabe su majestuosidad como ejemplifican los viaductos de Port-Launay (54 metros de altura en la línea Nantes-Brest, 1860) o Cruize (63 metros de altura en la Marvejols-Neussargues de 1880).

Los mayores viaductos de piedra se levantaron en la Europa continental. Viaducto de Morlaix, sobre el río Dossen (1863). Puente sobre el río Ferrera, en Asturias. Fotografía y grabado (pag. dcha.) del viaducto de Goltzsch (línea Reichenbach-Plauen, 1851), el mayor viaducto de piedra nunca construido.

(pag. dcha. sup.) Viaducto de Port-Launay, sobre la ribera del Aulne (línea Châteaulin-Landerneau, 1867). Viaducto de Chaumont sobre el valle del Suize (línea Paris-Bâle, 1856).







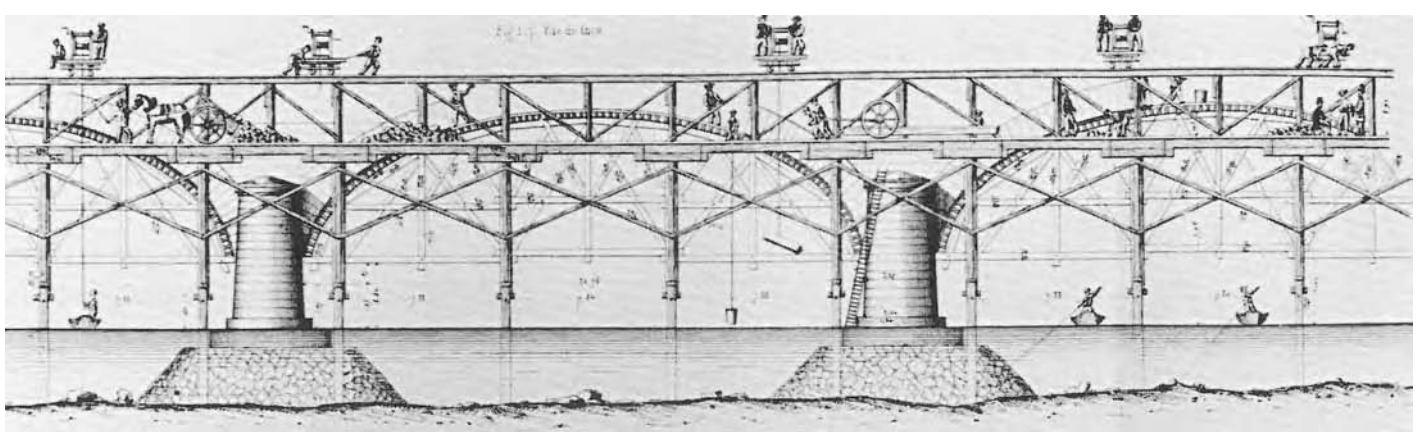
Todos los puentes de piedra requerían "puentes" previos de madera que soportasen la bóveda durante su construcción. Sólo una vez cerrado en su centro puede el arco soportarse a sí mismo, lo que en épocas clásicas y medievales llevó a la errónea suposición de que la piedra central jugaba un papel más decisivo que el resto, lo que posiblemente tenga que ver con que hoy llamemos a esta pieza "clave" del arco.

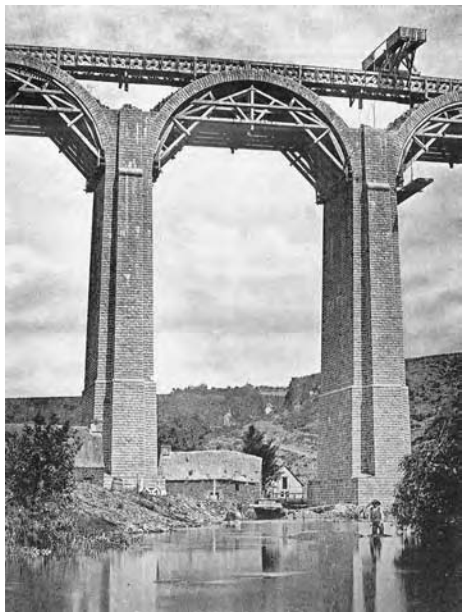
En los puentes más bajos las cimbras podían apoyar sobre el terreno, pero en los más altos o donde un gran cauce lo impedía, las cimbras debían apoyarse sobre las propias pilas ya levantadas, para lo que se dejaban en éstas sillares que sobresalían o huecos para el empotramiento de ménsulas provisionales de madera que todavía se ven o intuyen en muchos de estos puentes. Cimbrar todo un largo puente para la construcción simultánea de los arcos multiplicaba la inversión en cimbra, dolorosa al tratarse de un elemento provisional al que no en vano se llama también obra muerta. Por ello, la construcción evolutiva, vano a vano, se prefirió en ocasiones aunque, mientras durase, los empujes sobre las pilas fuesen mayores.

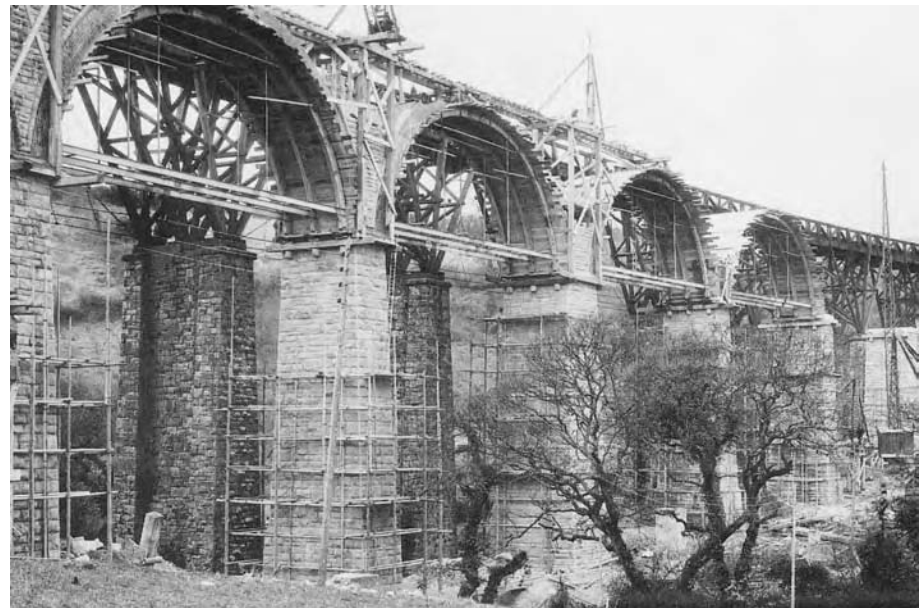
Incluso cuando se cimbraba todo el puente, la construcción de las propias bóvedas de piedra, que sin relleno y tímpanos son sólo una parte del peso y por lo tanto del empuje, se solía iniciar sobre las primeras cimbras mientras se levantaban las siguientes. La cimbra completa servía en ocasiones para poder contar desde un principio con todo un tablero provisional para el transporte con vagonetas de los materiales de bóvedas, tímpanos y relleno, agilizando significativamente la construcción que podía además repartirse rápidamente en tantos tajos de trabajo como vanos tenía el puente. Esta era por tanto una forma de construcción a la que se tendía para reducir los plazos.

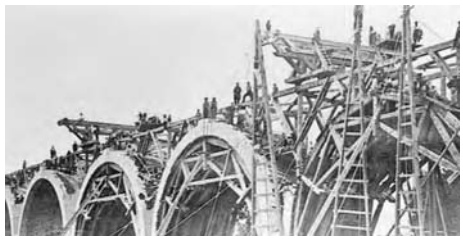
(pag. derecha) Construcción de los viaductos ferroviarios de Meil ar Guido (Francia, 1867), de College Wood (en sustitución de un sexagenario viaducto de madera de Brunel, Cornwall, 1934), de Los Franceses (Madrid, 1861), de Noyen (Francia), y de Perrasier en la línea París-Orleans.

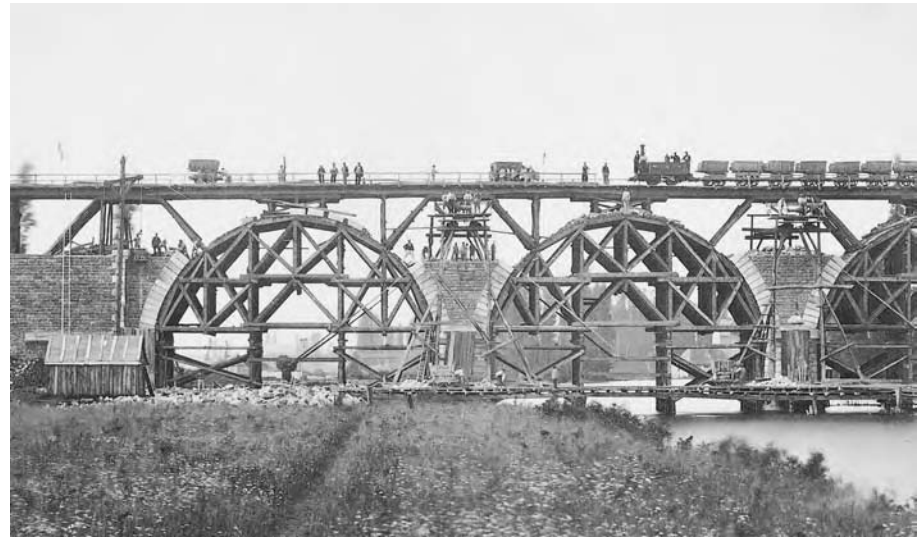
Construcción del viaducto ferroviario de Montlouis sobre el Loira, con un tablero provisional con dos niveles que facilitó la circulación en obra mejorando plazos y coste.







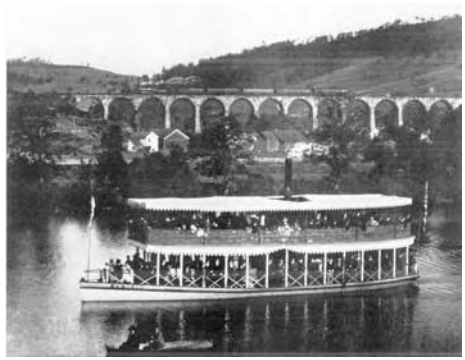


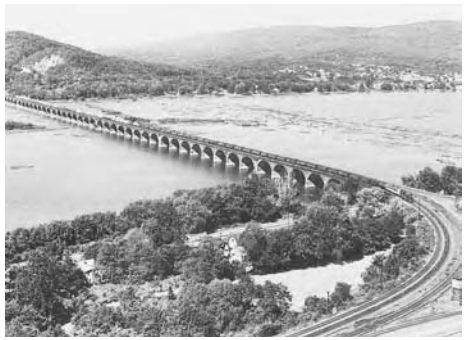


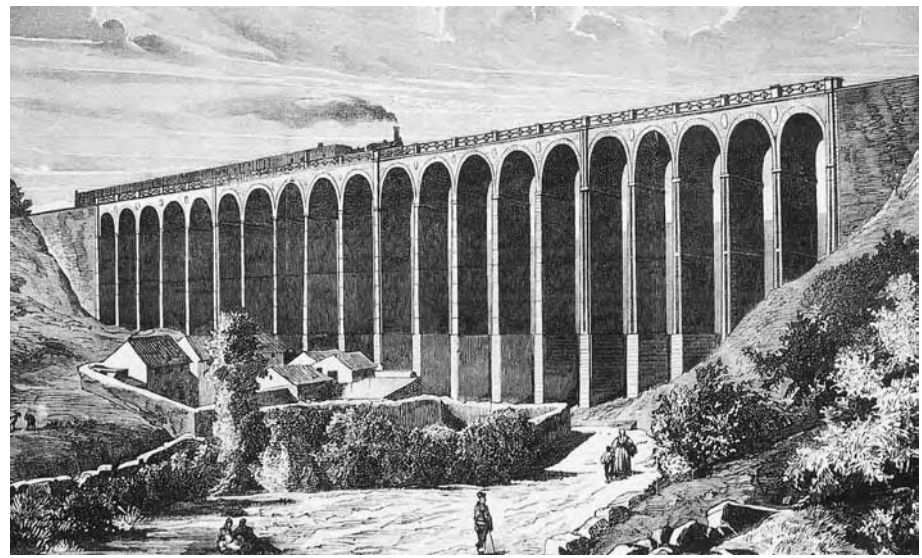
Viaducto de Termopilas en el desfiladero de Pancorbo (línea Madrid-Irún, 1862).

En Estados Unidos el material predilecto en los inicios del ferrocarril y hasta la consolidación del hierro fue como veremos la madera, pero la piedra también se empleó en ocasiones. Un ejemplo muy temprano es el único arco del viaducto de Carrollton, en el Baltimore&Ohio Railroad, que data de 1829. El Thomas Viaduct, de 1835, se encuentra en la misma línea y es uno de los poco habituales ejemplos americanos directamente influidos por los referentes británicos de robusta y duradera, pero cara y lenta, construcción en piedra. El magníficamente proporcionado viaducto de Starruca sería otro; con 300 metros de longitud y altura de hasta 33 metros, fue construido en 1848 para el New York&Erie Railroad. Los pocos usos de la piedra solían reservarse en cualquier caso a entornos urbanos, siendo el Stone Arch Bridge de Minneapolis, ya de 1883, unos de los ejemplos más conocidos. Pero el más largo de todos los viaductos de fábrica norteamericanos no llegaría hasta entrado el siglo XX. Al puente de Rockville, que en 1902 alcanzó la magnífica longitud de 1.164 metros, se le asigna en algunas publicaciones estadounidenses el record mundial de longitud en esta tipología, olvidando el inigualable precedente de Londres que como hemos visto ya en 1836 quintuplicaba su longitud.

También en España en la segunda mitad del siglo XIX se construyeron interesantes arcos de piedra que, haciendo gala de la solidez y elevada masa relativa de esta tipología, siguen en su mayoría hoy en servicio. Son frecuentes las combinaciones de distintos materiales, siendo lo más habitual emplear ladrillos para tímpanos y bóvedas, la sillería para las aristas y la mampostería para el resto de paramentos. Uno de los primeros y más destacados es el viaducto de Buxadell en Manresa para la línea Barcelona-Zaragoza, de 1859. También de la primera época son los de la línea Madrid-Irún, para la que se construyó en 1862 el viaducto de Termopilas en el desfiladero de Pancorbo. Ya en la década de 1880 destaca el viaducto lucense de A Chanca, como también los de Gaia, el Tajo o los Masos. Con la aparición del hormigón en el siglo XX esta tipología cayó en desuso, pero siguieron apareciendo realizaciones esporádicas entre las que cabe destacar el singular, por su forma y por lo tardío de su construcción, viaducto de Lozoya, de 1968.







Viaductos norteamericanos de Starruca (1848), Minneapolis (1883) y Rockville (1902).
Viaductos españoles de Buxadell (1859) y de la Chanca (Palencia-La Coruña, 1874).

Viaducto de Lozoya (línea Madrid-Burgos. 1968).
Viaducto de Fontpedrouse en el pirineo oriental (1915).

Por su forma, en la que se recurre a un arco ojival que recoge la carga de una de las pilas para salvar una luz mayor, el puente de Lozoya recuerda al viaducto de Fontpedrouse, magnífico ejemplo de la imprescindible antifunicularidad de la construcción con piedra, construido en 1915 en la línea pirenaica entre Villefranche y Bourg-Madame. Se trata de una de las obras cumbres del que ha sido probablemente el definitivo maestro en la construcción de puentes de piedra: Paul Sejourné. Junto al de Fontpedrouse, también conocido simplemente como "pont Sejourné", destacan también en la obra de este gran ingeniero francés puentes ferroviarios como los de Lavaur y Antoinette, con importantes luces de 61 y 48 metros respectivamente.

En una época, ya a principios del siglo XX, en que como veremos se habían ya levantado algunos de los más grandes puentes metálicos que nunca se hayan concebido y en la que el hormigón comenzaba su prometedora andadura, los puentes de Sejourné son algunos de los últimos vestigios de una milenaria tecnología de la construcción que el ingeniero francés llevo a su extremo, pero que, bajo el peso de su lenta y artesanal construcción siempre asociada a las costosas cimbras, habría de acabar capitulando ante el hormigón y el acero que hoy dominan prácticamente por completo el panorama de la construcción de puentes.

Entre los avances que introdujo Sejourné, en su afán por aligerar el peso de los viaductos de piedra y aumentar su competitividad, están por ejemplo las arcadas secundarias situadas entre arcos principales que, como se ejemplifica en el propio puente de Fontpedrouse, suponen una gran economía de material y peso en los riñones; aunque todavía mayor es la que se derivó de pasar a dividir las anchas bóvedas que se venían construyendo por dos estrechas bóvedas laterales paralelas, que se construían sucesivamente permitiendo un mayor reaprovechamiento de las cimbras, y entre las que Sejourné introdujo ya tableros de hormigón para salvar la luz transversal que las separaba.

Son desde luego más las obras que, aferradas a la superior durabilidad e integración paisajística de las construcciones con piedra, han seguido ya en el siglo XX ofreciendo magníficos ejemplos tardíos de la construcción con este material. Entre ellas cabría destacar las de línea transpirenaica entre Oleron y Canfranc o, por supuesto, las que el ferrocarril suizo levantó en sus líneas alpinas y que incluyen espléndidos viaductos como los de Wiesen o Landwasser, cuya elevada curva en el aire magníficamente integrada entre las laderas de la gran cordillera europea es tan, justificadamente, conocida.

Desde estos últimos ejemplos de la construcción con piedra, ya alejados de la época de los primeros puentes del tren, conviene volver la vista atrás a los inicios del ferrocarril un siglo atrás, donde otro material hoy también desplazado de la construcción de puentes habría de jugar un papel protagonista.

Pont du Moulin. Puente Soltan.
Viaducto sobre el río Landwasser, en los alpes suizos (1902).

1.3 Puentes de Madera

Antecedentes en la construcción con madera

La madera es el material que ha servido al hombre en sus primeros pasos sobre los cursos de agua. Los troncos se prestan lógicamente a la construcción del puente más elemental mediante tramos rectos a modo de vigas simples apoyadas en sus extremos. El paso siguiente es el de puentes aporticados en los que la longitud del tramo más largo se reduce mediante jabalcones inclinados. Obras más elaboradas en forma de arcos o vigas en celosía se conocen también desde los romanos, aunque la primera intuición clara sobre el funcionamiento de una viga celosía y el principio de la triangulación, siendo el triángulo la única figura cuya geometría no puede variarse sin cambiar la longitud de uno de sus lados, suele atribuirse al renacentista veneciano Palladio en el siglo XVI.

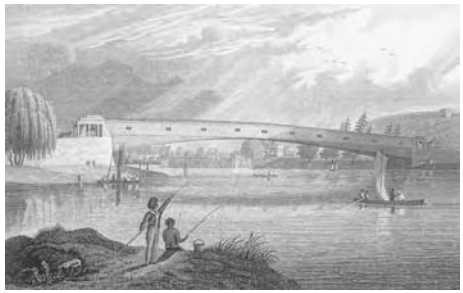
Los puentes de madera han sido siempre más rápidos y fáciles de construir que los de piedra; la construcción de un puente de piedra, de hecho, requiere la ejecución previa de un puente de madera como cimbra. El suministro y preparación de los elementos de madera para el puente es también mucho más simple. Por lo tanto, los puentes de madera han resultado en general mucho más económicos y sencillos que los de piedra y por ello a lo largo de la historia se han construido muchos más puentes con madera que con ningún otro material.

La madera, sin embargo, plantea problemas de durabilidad y por ello ha acostumbrado a ir asociada a un cierto carácter de provisionalidad. El propio deterioro del material, el riesgo de incendio y la vulnerabilidad frente a las riadas de las pilas de madera son probablemente los tres factores que más han contribuido a acortar la vida de los puentes de madera, motivando que sean muy contados los que desde épocas anteriores han perdurado hasta nuestros días. Se trata de una situación casi opuesta a la de los puentes de piedra, de los que se conservan muy numerosos ejemplos con varios siglos, e incluso milenios, de antigüedad. Por ello en muchas ocasiones se construyeron los más rápidos y baratos puentes de madera con la aspiración de poder sustituirlos por uno de piedra en cuanto hubiese recursos para ello. A los puentes de piedra se les asignaban, justificadamente, muy superiores cualidades de robustez y seguridad y muestra de ello puede ser el que en tantas ciudades asomadas al cauce de un río de importancia acostumbre a haber un antiguo puente al que se llama "puente de piedra" en la toponimia local. Es lógico suponer que dicha denominación se asoció en su día a la primera obra de calidad y durabilidad superior con la que todo asentamiento próximo a un curso de agua importante aspiraba a contar.

Las estructuras de madera fueron ganando en importancia al usarse como cimbras de arcos de piedra o fabrica de tamaño creciente, pero la edad de oro de los puentes per-

(en pag. derecha) Sección-alzado del Colossus. Planta, secciones y alzado del puente sobre el Rin de los hermanos Grubenmann en Schaffhausen (1757).

El Collossus sobre el río Schuylkill (1812)



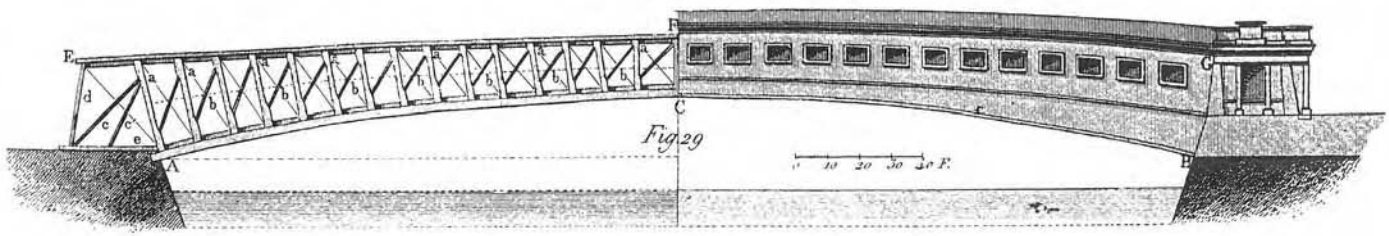
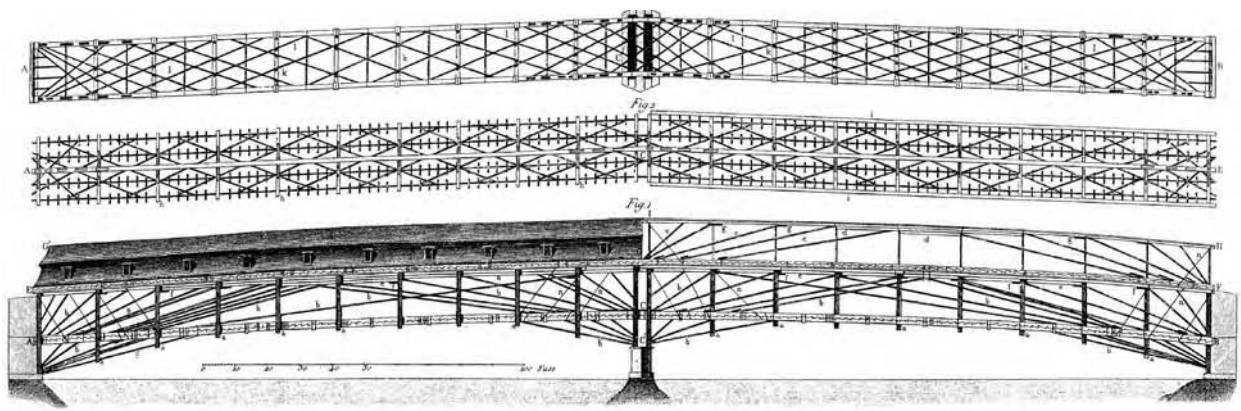
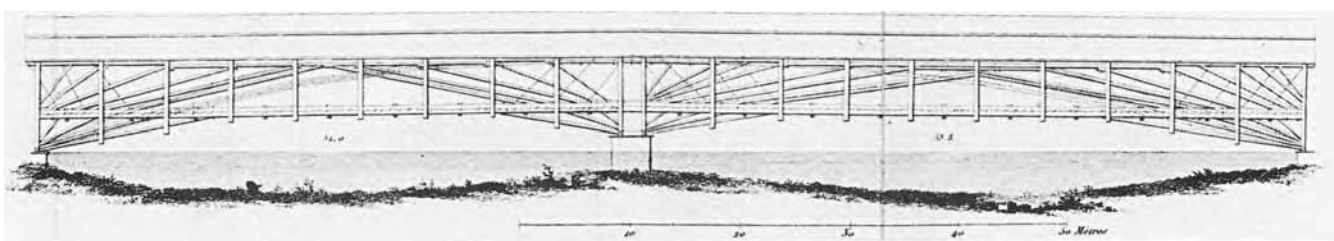


Fig. 29





manentes de madera no se iniciaría hasta la aparición de los hermanos Grubenmann, carpinteros suizos del siglo XVIII, que llegaron a salvar una luz de hasta 61 metros en el puente de Wettingen en 1758. Sus puentes de madera, que mezclaban con poca claridad arco y celosía, se conocieron en todo el continente y fueron un impulso sin precedentes para el uso de la madera en la construcción de puentes en el centro de Europa, con Suiza a la cabeza.

Sin embargo, el desarrollo final de los puentes de madera, que no es otro que el desarrollo de las celosías, tuvo lugar en los Estados Unidos donde los pioneros americanos, sin tradición en la construcción con piedra, emplearon los inmensos recursos de los todavía abundantes bosques vírgenes para salvar los cauces del nuevo mundo. A principios del siglo XIX, en un periodo que suele denominarse como el de los "Carpenter engineers", se levantaron puentes tan sobresalientes como el techado Colossus de 1812 sobre el Schuylkill en Pennsylvannia, obra de Wernwag, o el McCalss Ferry de 1815 sobre el Susquehanna, construido por Theodore Burr. Con 104 y 110 metros de luz estos puentes, aunque construidos hace casi 200 años, posiblemente sean los puentes de madera de mayor luz que se hayan construido. Esto es comprensible ya que, poco después de su construcción, la llegada del ferrocarril y sus mayores cargas acapararían la construcción de los grandes puentes sin que estas luces pudiesen repetirse. En sólo unas décadas, además, el tren daría el impulso definitivo a la siderurgia que a partir de entonces desplazaría definitivamente a la madera para las grandes luces.

En el periodo de los "Carpenter engineers" no se llegó a alcanzar una comprensión clara del funcionamiento de la celosía y ésta siempre se combinaba de forma confusa con el arco, tal y como antes habían hecho los Grubenmann. El primer diseño moderno de celosía que se independizó del arco no llegaría hasta 1820 y se debe al arquitecto norteamericano Ithiel Town que introdujo la celosía enrejillada o celosía múltiple. Su gran virtud fue el pasar a emplear muchas piezas pequeñas con uniones numerosas pero sencillas, facilitando su suministro y reduciendo mucho la cualificación que se requería para los trabajadores. Esto facilitó mucho la construcción de los puentes e hizo que esta patente se emplease por doquier. Era habitual techar a dos aguas estos puentes para mejorar su durabilidad, lo que les daba un aspecto característico y ha ayudado a que los pocos que han perdurado se conserven ahora como preciados monumentos de la breve historia norteamericana. Uno de los primeros modelos de celosía con el que el de Town hubo de competir fue el de Long, patentado en 1830, que sustituía las rejillas en las almas por elementos singulares y retornaba hacia el arco con una serie de jabalcones inclinados en la zona de apoyos. Por entonces, la aparición de nuevos y mejores tipos de celosía era ya inminente como lo era la del que habría de ser el mayor benefactor y beneficiario de esta tipología estructural: el ferrocarril.

Puentes cubiertos norteamericanos. Puente de Woodstock en Connecticut. Celosía tipo Town en el puente cubierto de Cornish-Windsor sobre el río Connecticut (1866).

Celosía Howe en el puente ferroviario sobre el río Skykomish.
Celosía tipo Pratt para el paso del ferrocarril sobre el río Winnipesaukee (1896).
Palizada y celosía tipo Howe en el Canadian Pacific Railway (1885).

La madera en los puentes del tren

Con la llegada del ferrocarril a los Estados Unidos puede decirse que la construcción de puentes de madera avanzó por dos caminos diferenciados pero siempre acordes al espíritu del ferrocarril en general y del americano en particular: puentes económicos, de fácil construcción y rápido montaje.

El primer camino continuó la evolución en el diseño y análisis de las celosías que iría asociada a la transición de la madera al hierro. En los años 40 Howe y poco después los hermanos Pratt desarrollaron, y patentaron, sus conocidos diseños de celosía que ya incorporaban barras de hierro forjado trabajando a tracción para los montantes (Howe) o las diagonales (Pratt) de la celosía. Era cuestión de tiempo que también los elementos comprimidos se sustituyesen por barras de fundición y que el hierro pasase a heredar los modelos y patentes que se desarrollaron en un principio para la madera. Antes, sin embargo, se construirían para las primeras líneas numerosas celosías, que en ocasiones eran incluso enviadas como grandes piezas de mecano embaladas cuyo montaje estaba al alcance de cualquiera. Las tipo Town de madera o tipo Howe y Pratt combinando la madera con el hierro fueron las más habituales. De éstas hoy apenas hay referencias pues tendieron a reemplazarse rápidamente por puentes de hierro, aunque cabe destacar algunos ejemplos como las celosías tipo Town con luces de 50 metros que en 1838 realiza B. H. Latrobe para la línea Baltimore-Ohio.

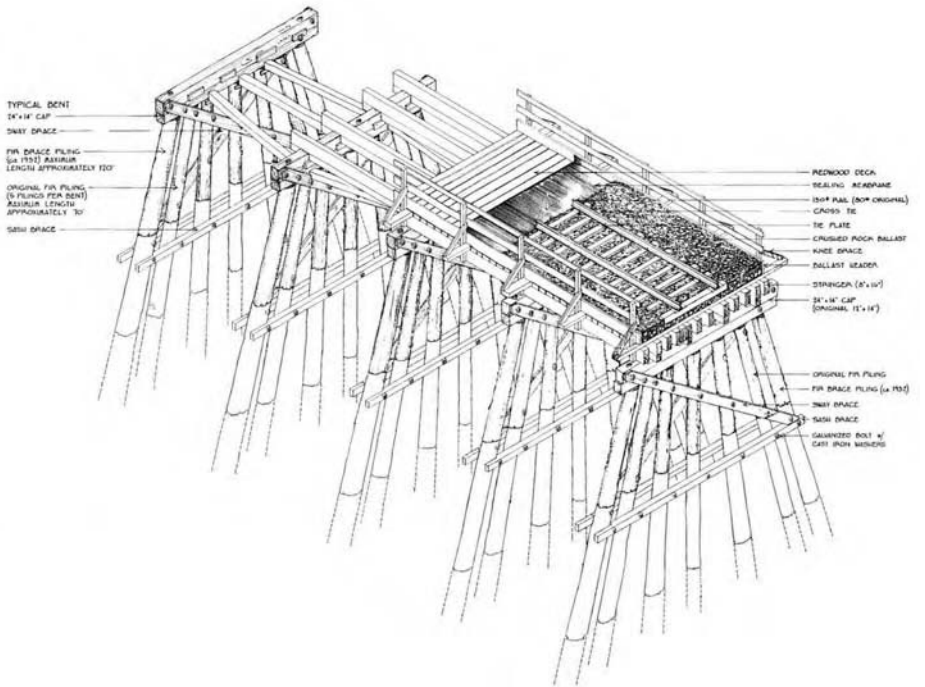
El segundo camino fue el de las líneas transcontinentales que avanzaban sin descanso demandando puentes rápidos, económicos y sencillos. Fruto de esta otra tendencia son las tupidas palizadas que atravesaban los profundos valles norteamericanos y que son sin duda las estructuras de madera cuya imagen ha quedado más íntimamente ligada al inicio del ferrocarril en Norte América y a la conquista del Oeste. Sobre ellas el tablero se conformaba con vigas simples de madera o vigas Howe de poca longitud. Muchas se levantaron (o reconstruyeron) durante la guerra civil de los Estados Unidos, primera en la que el ferrocarril jugó un papel importante y en la que su infraestructura se convirtió, por tanto, en objetivo de guerra. Sin embargo su época dorada llegó tras la guerra con la expansión hacia el Oeste y las grandes líneas transcontinentales de la segunda mitad de siglo. La palizada más conocida probablemente sea la de Portage en el estado de Nueva York, que con 276 metros de longitud y 71 de altura era el viaducto más alto del mundo, aunque son innumerables los ejemplos que merecerían ser destacados.

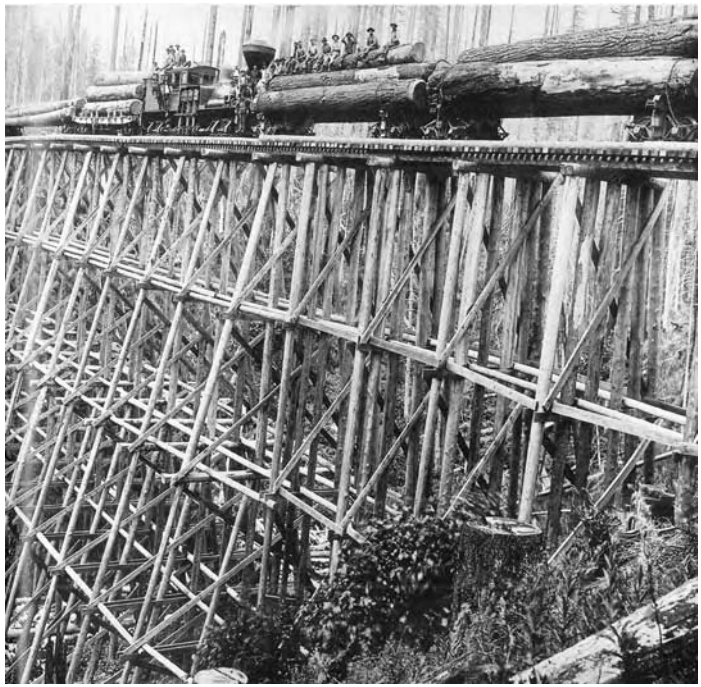
Estas palizadas de aspecto imponente y que tan gran servicio han prestado al desarrollo inicial del ferrocarril acostumbraban sin embargo a ser estructuras perecederas motivadas por la necesidad de un rápido y barato avance de las líneas que no requiriese

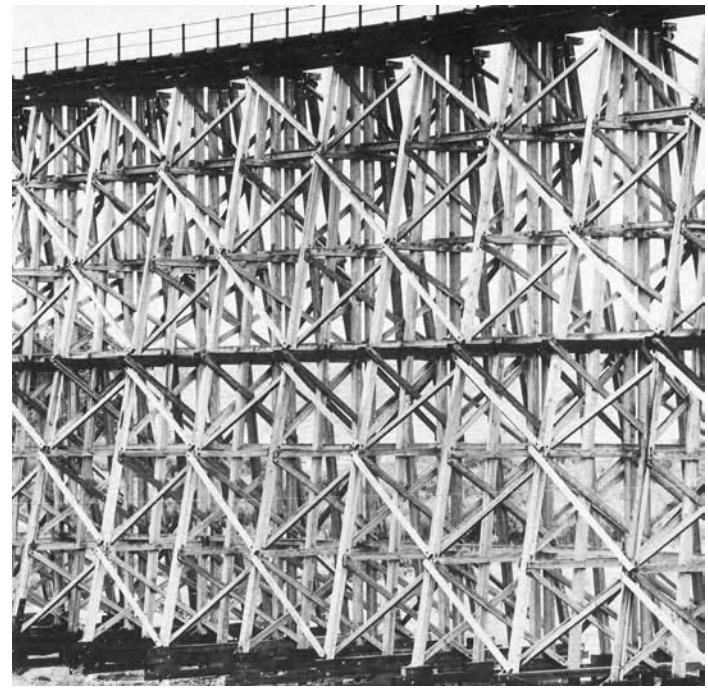
Viaducto de Hull Creek.
Croquis de detalle de una palizada de madera.

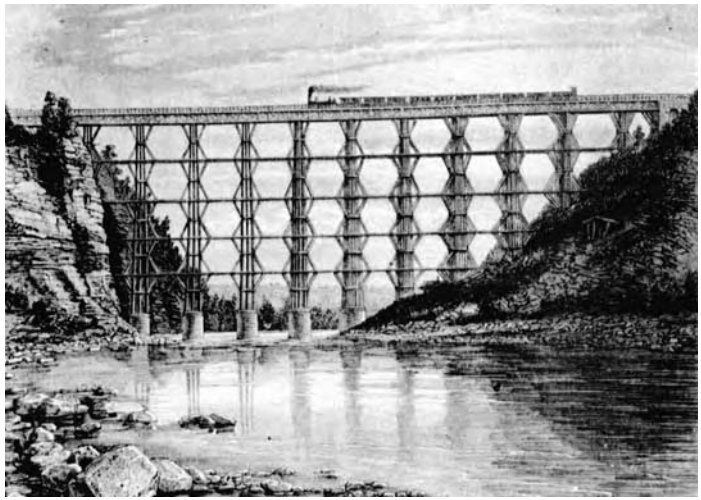
(en página derecha)
Ejemplos de palizadas: Puente de Red Cabin Creek bajo una prueba de carga (1916). Puente de Burlington en el Northern Railway de Montana (1930). Viaducto de Portage en Nueva York, la mayor que haya existido (1852). Puente del Canadian Pacific Railway (1855).

mano de obra especializada. Permitían además repartir mucho la carga sobre el terreno con lo que la cimentación podía ser también sencilla y poco exigente, aunque solía por ello quedar en exceso expuesta. En la fiebre de la expansión, la durabilidad no era una prioridad por diversos motivos. Uno importante sin duda fue que el éxito de las compañías que se lanzaron a construir las líneas transcontinentales dependía de una rápida obtención de las ayudas del congreso, en dólares y tierras, que se asignaban por cada milla de vía tendida, con lo que estas compañías tendían a preocuparse más por el "cuanto" que por el "como" del avance de sus líneas. Por ello no pocas palizadas sucumbieron ante el fuego, las riadas o avalanchas e incluso ante el peso de los trenes. No era infrecuente que los viajeros bajasen del tren para que éste cruzase antes la palizada y después pasar ellos caminando. En general fueron sustituyéndose por viaductos metálicos pasados no muchos años desde su construcción.

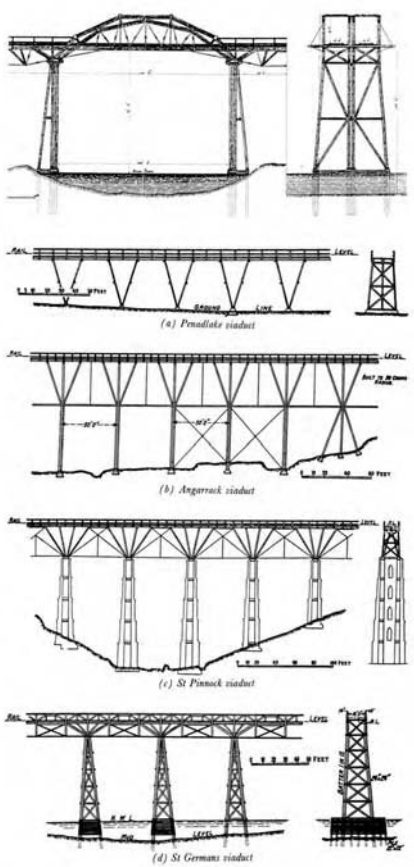


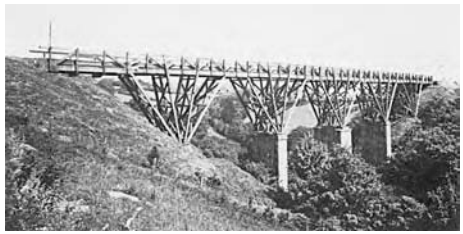






Esquemas de las muy diversas configuraciones de los puentes de madera de I.K. Brunel de mediados del siglo XIX y fotografía del puente de Penryn en el ferrocarril de Cornwall.





En Europa el mayor exponente de la utilización de la madera fue, de nuevo, Isambard Kingdom Brunel a mediados del siglo XIX. Buena muestra de su extraordinario talento y polivalencia como ingeniero es el que su obra no pueda dejar de tener un lugar destacado en ninguno de los apartados, piedra, madera y hierro, del presente capítulo dedicado a los primeros puentes ferroviarios.

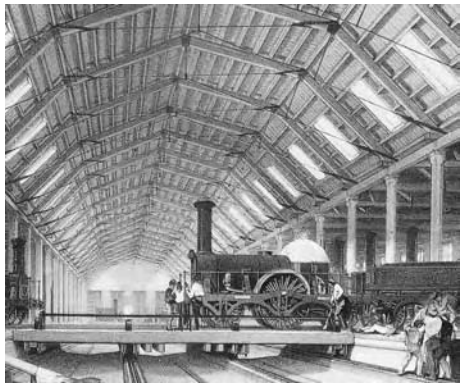
Para sus líneas de South Devon y Cornwall, que siguieron al Great Western Railway a mediados del siglo XIX, fueron necesarios más de 60 viaductos que en su mayoría Brunel diseñó en madera con una gran diversidad de tipologías. En un momento en el que en Gran Bretaña la experiencia con el hierro ya daba sus frutos, Brunel supo escoger el material no sólo en función de sus posibilidades estructurales sino también teniendo en cuenta otros factores, como la economía, el plazo de ejecución o la disponibilidad en la zona de la línea de los materiales y de mano de obra cualificada. En el sur-oeste de Inglaterra esta última brillaba por su ausencia, pues los trabajadores con experiencia estaban concentrados en el interior y el noreste, donde los ferrocarriles se iniciaron.

Con un cierto paralelismo con el éxito de las patentes de celosía y las palizadas americanas, Brunel diseñó varios modelos de viaductos cuya cualidad principal es que podían ser rápida y eficazmente construidos por cualquier carpintero competente. Brunel, sin embargo, sí puso especial interés en la perdurabilidad de estas estructuras, estudiando la adecuada protección y mantenimiento de la madera y previendo en sus diseños la posible sustitución de los elementos más dañados de la estructura. Fruto de este interés es el que muchas de estas estructuras hayan perdurado en servicio hasta bien entrado el siglo XX, aunque, siendo parte de importantes líneas, hoy han sido todas ya sustituidas, la última en 1934.

Sus diseños eran tremendamente diversos, abarcando desde arcos bowstring de 35 metros de luz hasta pequeñas vigas simples sobre pilas en "V". El más característico y utilizado, sin embargo, se caracterizaba por el uso de jabalcones abanicados sobre pilas de piedra o madera.

Brunel fue un ingeniero de genial polivalencia y entre sus estructuras de madera se contaron también buques, estaciones o, por ejemplo, la "Engine house", construida en 1846 en Swindon, cuya cubierta combinaba con gran sentido la madera y el hierro forjado. En esta gran nave se reunían, mantenían y reparaban las locomotoras del Great Western railway con un eficiente aprovechamiento del espacio logrado gracias a un original sistema para su traslado dentro de la nave.

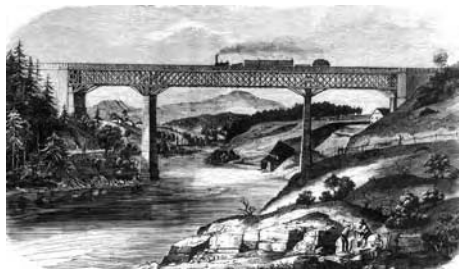
Puentes arco de madera para el ferrocarril: Viaducto de Etheraw, con diseño de Locke (1842) y de Maisons Lafitte sobre el Sena (1843).
Cubierta de la Engine House para el Great Western Railway con diseño de Brunel (1846).
Viaducto de Slade, Brunel (1844).



También hubo algunos ejemplos en Inglaterra, Francia o Alemania de puentes multiarco de ferrocarril en los que se buscó mayor rapidez y economía de construcción levantando arcos de madera en lugar de los tradicionales de sillería. Las pilas sí se mantuvieron en general de piedra, previendo la posibilidad de que los ligeros arcos de madera se tuviesen que sustituir eventualmente por otros de un material más durable como de hecho sucedió en la mayoría de los casos. Los de Sesnieres (1837) o Maissons-Lafitte (1843) sobre el Sena, los de Wellington y Oeseburn de los hermanos Green en Inglaterra (1839), o el también inglés Etherow viaduct (1842) de Joseph Locke son algunos ejemplos.

El resultado, sin embargo, no fue del todo satisfactorio, por lo que esta solución no se extendió y los ejemplos ya construidos se sustituyeron a corto-medio plazo. Esto es lógico, pues al contrario que los arcos de piedra, las ligeras estructuras de madera eran muy sensibles al gradual aumento del peso de los trenes. El carácter dinámico de las cargas que fatigaban las cruciales uniones entre piezas también contribuyó a acortar la vida de estas estructuras, que solían construirse con la aspiración de poder sustituirlas por estructuras definitivas de hierro o piedra en cuanto se reuniesen para ello los recursos económicos necesarios.

Más tarde, con la llegada a Europa de los modelos de celosía americanos, se construyeron a finales de los años 40 y sobre todo en los años 50 varias celosías de madera en la Europa continental siguiendo estas soluciones. Fueron mucho menos numerosas



Celosías tipo Howe en Kempten (Alemania, 1850) y sobre el Rin en Bad Ragaz (Suiza, 1857).

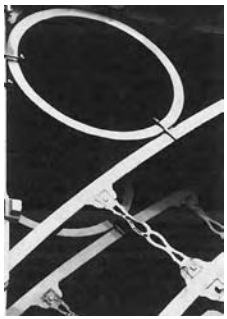
(en página derecha)
Celosía tipo Howe sobre el río Kootenai (Idaho, 1932).

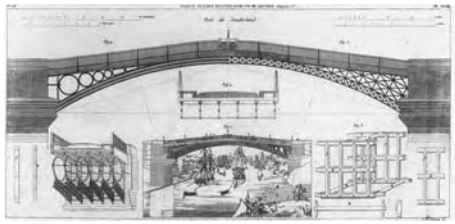
que en Estados Unidos, pues su inicio fue más tardío y el salto al hierro tardó poco en llegar. Hubo en todo caso ejemplos destacados como el viaducto del "Ludwigs-Süd-Nord-Bahn" de tipo Howe construido en Alemania en 1850 con un vano central de 52.5 metros, o el puente de Bad Ragaz sobre el Rin, de 1857 con seis vanos con longitudes en torno a los 25 metros.

También en España se recurrió a la madera en las primeras líneas, con ejemplos significativos como el del modesto puente tipo Town sobre el Besós construido ya en 1848 para la primera línea de la península entre Barcelona y Mataró. Estos puentes se apoyaban sobre pilas y estribos de fábrica, pero también con cierta frecuencia sobre apoyos en palizada de madera, como en el caso del primer puente ferroviario sobre el Tajo, de 1851. Uno de los más destacados puentes de madera españoles, con una longitud de más de 140 metros, se construyó también con el modelo Town y pilas en palizada de madera sobre el Turia en la línea de Valencia al Grao, en 1852. En general las luces de estos puentes no superaban los 25 metros.

Además de por el envite de los pesados trenes y los caudalosos ríos, la delicada perdurabilidad de los puentes de madera fue también puesta a prueba por elementos menos naturales, pues los propietarios de carromatos y diligencias llegaron a incendiar puentes en un intento vano de frenar al ferrocarril que tan claramente amenazaba sus negocios de transporte. El más claro ejemplo fueron los incendios en la línea Játiva-Valencia en 1854, el mismo año de su inauguración. Nunca llueve a gusto de todos. Como en otros países, la madera se empleó como rápido y eficaz impulso para el avance de las primeras líneas, pero una vez establecidas éstas las estructuras de madera fueron gradualmente sustituyéndose por nuevos puentes, generalmente de hierro.

A partir del último tercio del siglo XIX el empleo de la madera fue cayendo en desuso primero en Europa y más tarde en Estados Unidos. Llegados al siglo XX este material, que había jugado un papel protagonista en los inicios del ferrocarril, quedaba ya relegado, salvo en raras excepciones, a estructuras provisionales. No por ello ha dejado de ofrecer, sin embargo, muchos magníficos "puentes" para cimbrar estructuras de otros materiales, en particular, como veremos, con la llegada del hormigón.





Perspectiva y detalle del Ironbridge en Coalbrookdale (1779).

Planos del puente de Sunderland (1796)

Pont des Arts en Paris reconstruido con idéntico esquema al del puente original de 1803.

Arco metálico propuesto por Telford para reemplazar al Old London Bridge (1801).

1.4 Los Puentes de hierro en su fase experimental

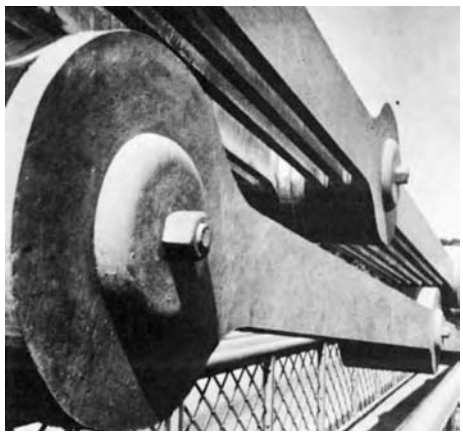
El hierro antes del tren

El hierro es obviamente progenitor del tren y por lo tanto, previamente a la aparición del ferrocarril moderno en 1830, ya se atesoraba, desde finales del siglo XVIII, una cierta experiencia en la construcción con hierro, impulsada por el progreso de la minería y la siderurgia en Inglaterra. En 1779 los herreros Darby y Wilkinson se adelantaron a su tiempo y levantaron el primer puente de fundición sobre el Severn en Coalbrookdale, hoy punto de paso obligado de las rutas turísticas por el oeste de Inglaterra. Pasarían 17 años hasta la construcción en 1796 del 2º puente metálico sobre el río Wear en Sunderland, con una sorprendente luz de 72 metros según un diseño de Thomas Paine.

El ingeniero que recibió de forma más entusiasta al nuevo material percibiendo su potencial fue de nuevo Thomas Telford, cuya contribución al progreso de las estructuras metálicas fue inmensa. Muestra de la confianza que alcanzó con este material es su conocida propuesta para la sustitución del Old London Bridge sobre el Támesis por un osado arco de fundición de 180 metros en 1801, sólo 5 años después de construir su primer puente de hierro y tercero del mundo sobre el río Severn. El adelanto que esta propuesta supuso para su época, unido probablemente a su coste, fue sin embargo más del que los responsables del concurso supieron aceptar, y finalmente se construyó un puente clásico de arcos de fábrica diseñado por Rennie y del que ya hemos hablado.

El puente de Saint-Louis, la pasarela del Pont des Arts en Paris o el puente de Austerlitz sobre el Sena, todos ellos construidos en Francia en la primera década del siglo XIX, son otros ejemplos tempranos de arcos de fundición.

Estas primeras muestras de la utilización del hierro no llegaron a explotar sus características específicas y las tipologías y detalles empleados eran en general adaptaciones de las empleadas en los arcos de piedra y puentes de madera. En general los primeros diseños demostraron falta de rigidez, pues todavía no incorporaban un concepto claro de la triangulación y su ligereza los hacía muy sensibles al paso de las cargas. En Francia, de hecho, llegaron a proscribirse por un tiempo los arcos de fundición tras la rotura del puente de Austerlitz y las excesivas vibraciones del Pont des Arts.



Detalle de las cadenas del puente de Menai (1826). Grabado del puente de Southwark de Rennie (1819). Puente de Craiggellachie de Telford (1814).

Puente colgante de Telford sobre el estrecho de Menai, con una luz de 177 metros, entre Gales y la isla de Anglesey (1826).

En Inglaterra, sin embargo, siguieron experimentando, y sería el mismo Telford, que en su propuesta para el London Bridge no había incluido diagonales, quien resolvería el problema interviniendo en el sistema estático, incorporando diagonales de contraviento horizontal en el arco y de rigidez vertical en los tímpanos, y pasando a considerar arco y tablero como un conjunto. Sus puentes de Bonar de 1810 o el de Craigellachie de 1814, con sus característicos tímpanos rígidos reticulares, son ejemplos de las primeras estructuras concebidas en coherencia con las ventajosas cualidades resistentes de la fundición. Antes de la rigidización con tejidos de barras triangulladas, Telford había diseñado también arcos con tímpanos de chapa maciza como los del acueducto de Pontcysyllte, sin duda otra de sus más espléndidas obras. También Rennie, el otro gran ingeniero de la época, construyó importantes puentes de hierro, y de hecho su puente de Southwark con un arco central de 72 metros supuso en 1819 el record mundial de luz, aunque la contribución de Rennie a las estructuras metálicas, o la del cualquier otro de sus contemporáneos, no es equiparable a la de Telford.

Además de en arcos, desde principios del siglo XIX se empezó a usar también el hierro forjado en los primeros puentes colgantes, primero en Estados Unidos y más tarde en Europa. Aunque como veremos esta experiencia no resultó directamente extrapolable para el inminente ferrocarril, no puede dejar de citarse el magnífico puente sobre el estrecho de Menai de 1826, obra que encumbró definitivamente a Telford y cuyo imponente escenario habría de albergar también futuras glorias ferroviarias. Probablemente sea el mayor logro en la construcción de puentes antes de que el tren llegase para revolucionarla.

Primeras aplicaciones del hierro en los puentes del tren

En 1830 el uso del hierro en los puentes podía considerarse habitual en Gran Bretaña y se acumulaba por tanto una cierta experiencia con este material en la construcción de puentes carreteros y acueductos para los canales. La forma estructural típica era como hemos visto el arco de hierro fundido y, en menor medida, el puente colgante con cadenas de hierro forjado.

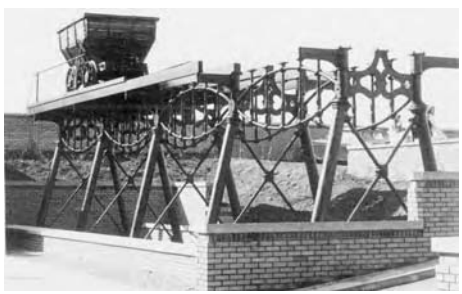
Sin embargo, esta valiosa y positiva experiencia no resultó siempre directamente extrapolable al ferrocarril. Los diseños empleados para los puentes colgantes eran excesivamente flexibles para el paso de las locomotoras, cuyo peso era evidentemente mayor que el de los peatones o carruajes que hasta entonces los cruzaban. Ya en la línea entre Stockton y Darlington de 1825, primera por la que circuló una locomotora, el capitán Samuel Brown construyó, con la colaboración de Robert Stephenson, el primer puente colgante de ferrocarril sobre el río Tees. El puente era mucho menor que otros colgantes carreteros que Brown había construido con éxito, pero no tardaron en darse cuenta de la poca idoneidad de este tipo estructural para el ferrocarril. En efecto, dada la falta de rigidez del tablero toda la estructura sufría importantes deformaciones al paso de los trenes y tuvo que sustituirse al poco tiempo.

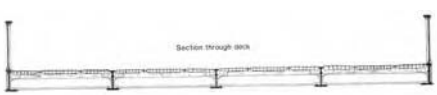
Los puentes colgantes dejaron de considerarse como una opción para el ferrocarril y los ingenieros del tren se quedaron sin la única tipología conocida para salvar grandes luces. En 1840 los hermanos Seguin repitieron el intento con un segundo puente colgante de ferrocarril en Lyon, pero tampoco resultó satisfactorio y sólo estuvo en servicio 4 años en los que los problemas fueron constantes. La idea generalizada de la invalidez de los puentes colgantes para el tren no cambiaría hasta que Roebling la desafió con su puente colgante sobre el Niágara en 1855, del que hablaremos más adelante.

En lo que se refiere a la otra tipología habitual para el uso del hierro, el arco de fundición, sí llegó a haber aplicaciones tempranas para el ferrocarril como la que hizo Robert Stephenson en 1838 en la línea London-Birmingham, siguiendo un esquema análogo al de los arcos pre-ferroviarios de Telford. El arco se solía conformar con dovelas de hierro fundido, apto para trabajar a compresión, en analogía a la propia disposición de los tradicionales sillares de piedra. En Francia, ya a mediados de siglo, se construyeron varios magníficos puentes multiarco como los de Nevers o Tarascon que permitieron el paso del tren sobre el Loira y el Ródano respectivamente.

Reproducción y piezas originales expuestas del puente de Gaunless de George Stephenson (1825), primer puente metálico de ferrocarril.

Sección transversal del puente de Water Street (línea Manchester-Liverpool, 1830).





Ejemplos de los primeros arcos de hierro para el ferrocarril: Puente en la línea London-Birmingham (1838) y viaductos ferroviarios franceses de Nevers (1850) y Tarascon (1852).

Sin embargo el arco muchas veces tampoco resultó adecuado para el ferrocarril, pues con frecuencia obligaba a elevar la rasante lo que implicaba no sólo un por entonces muy costoso movimiento de tierras, sino sobre todo unas pendientes que comprometían la funcionalidad de la línea. El arco suponía también una importante reducción de gálibo bajo los riñones, no siempre admisible al cruzar caminos o cauces navegables. Las locomotoras requerían además pasos de gran rigidez, y algunas experiencias previas poco afortunadas con los ligeros arcos metálicos no los hacían aconsejables en este sentido. Sin una adecuada triangulación que proporcione rigidez a los tímpanos, la idea del arco se ve severamente amenazada si una gran carga puntual, como la de una locomotora, debe trasladarse por un ligero arco metálico de poca rigidez y capacidad a flexión. La opción del puente de vigas podía resolver estos problemas, pero en cambio solo resultaba práctica para luces pequeñas, pues la fabricación de piezas de fundición de gran tamaño solía producir defectos en éstas. En esta situación se construyeron en los primeros días del ferrocarril puentes metálicos de diversas tipologías no siempre satisfactorias y de los que, al no haber perdurado, existen pocas referencias.

Suele considerarse que el primero de ellos es el Gaunless Bridge, construido en 1824 por George Stephenson para su primerísima línea entre Stockton y Darlington. Pese a su falta de formación y su condición de autodidacta, su intuición estructural y mecánica es patente en este singular diseño. La novedosa forma lenticular de las vigas de 4 metros empleaba fundición para los montantes comprimidos y en cambio aprovechaba la resistencia a tracción del hierro forjado en los cordones superior e inferior; venía a entrelazar los dos conceptos clásicos de la suspensión y el arco, aunque podría también interpretarse como una viga cuya altura se adaptaba adecuadamente a los esfuerzos en sus diferentes secciones y para la que sólo se echa en falta la presencia de diagonales en el alma. Pese a su buen comportamiento durante más de 75 años (ahora está en un museo) tuvo pocas réplicas, quizás por su limitada luz de 4 metros y porque el hierro forjado que empleaba era en los inicios del ferrocarril todavía muy costoso.

Otro ejemplo temprano de puente metálico es el Water Street Bridge, con vigas de fundición de 7 metros, construido en 1830 en la línea Manchester-Liverpool; su solución vino forzada por condicionantes de rasante y gálibo que hacían inviable un tradicional puente de arco de piedra. Con una resistencia a tracción poco mayor que la de la madera y en torno a 6 veces más baja que la resistencia a compresión, la forma adecuada para las vigas de fundición es la T invertida que ya se empleó en este puente, y se venía usando en las fábricas de algodón inglesas.

Esta obra es interesante también por haber unido por primera vez a Robert Stephenson con William Fairbarn, experto en la fabricación y elaboración de piezas metálicas, y Eaton Hodgkinson, físico que estaba estudiando teórica y experimentalmente la rotura de vigas. Volverían a colaborar 20 años después en un puente viga con una luz 20 veces mayor: el Britannia. La solución que habría de permitirlo, desde luego, sería muy diferente a la que venían empleando en la época en la que se construyó el Water Street Bridge, pues el empleo de vigas de fundición no resultaba extrapolable a luces importantes, al no ser posible hacer con seguridad piezas de fundición de mucho mayor tamaño.

Un intento de resolver el problema fueron las vigas de dovelas de fundición o "compound girder", que intentaban salvar luces mayores uniendo tramos más cortos de vigas de fundición. Para resistir las tracciones éstas se reforzaron con barras de hierro forjado que incluso se presolicitaban con cuñas hasta tensiones de 124 MPa, en lo que podría considerarse un antepasado del pretensado para un material, la fundición, que como el hormigón no era adecuado para resistir tracciones. Las primeras vigas de este tipo eran de luces cortas, no más de 15 metros. Sin embargo los Stephenson fueron aumentando la luz de este tipo de vigas hasta los 31.7 metros del puente que construyeron sobre el Arno en 1846 para la línea Florencia-Pisa-Livorno. El mismo año Stephenson construyó el puente de Dee en Chester con 3 vigas de dovelas de fundición de casi 30 metros atadas por barras de hierro forjado. Un año más tarde se añadió una capa mayor de balasto y al paso del siguiente tren el puente se desplomó acabando con la vida de 4 de los pasajeros.

Puente con "compound girders" diseñado por Robert Stephenson en la línea de Florencia a Livorno (1846).

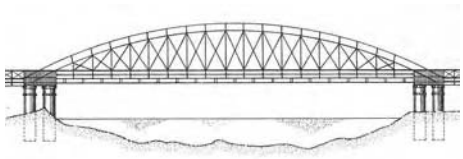
Grabado del desastre del puente de Dee (1846).

Aunque se recuperaría, este fue un duro golpe para Stephenson y para su prestigio. La comisión nombrada por la reina Victoria interrogaría a muchos de los más expertos ingenieros de la época para redactar un informe sobre el empleo de las estructuras metálicas en las construcciones para el tren (Report of the Commissioners appointed to inquire into the application of Iron to Railway Structures). Éste arroja una información de primera mano sobre los problemas tipológicos, tecnológicos y estructurales de la fundición y evidencia las dudas y desconocimiento del hierro que todavía existían. Al fin y al cabo este nuevo material apenas llevaba una década empleándose de forma más o menos habitual en el ferrocarril. Algunos ingenieros, como el genial pero excéntrico Brunel, se negaron a colaborar en defensa de la autonomía de la profesión, aunque quién sabe si la causa no sería evitar perjudicar a Stephenson al criticar las grandes vigas de fundición de las que es sabido que Brunel no era partidario.

Tras este suceso el hierro fundido prácticamente se abandonó en la construcción de las vigas de nuevos puentes, y los existentes no tardaron en irse sustituyendo, lo que ha limitado mucho las referencias que hoy existen de ellos. Francia había renunciado al empleo de la fundición en la gran mayoría de sus puentes desde mucho antes como hemos visto, pero los años de experiencia acumulada en Gran Bretaña con este material no deben menospreciarse, pues habían proporcionado a la industria del hierro una experiencia muy valiosa y los problemas surgidos, como en el principio de toda técnica, sirvieron para conocer mejor y poder avanzar en el desarrollo del hierro y de los puentes viga. Prácticamente coincidiendo con el accidente del Dee, de hecho, nacía en Inglaterra un nuevo material y una nueva tecnología: el hierro forjado en chapas unidas por cubrejuntas roblonados.

Viaducto de High Level en Newcastle, obra de Robert Stephenson (1849).

Puente ferroviario de Windsor, con diseño de I.K. Brunel (1849). Alzado y fotografía.

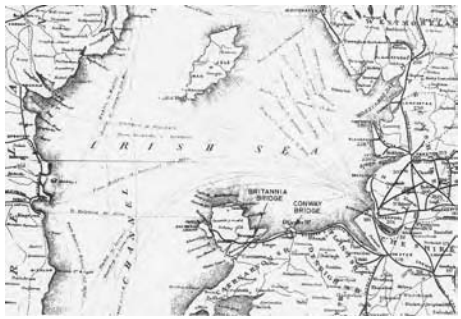


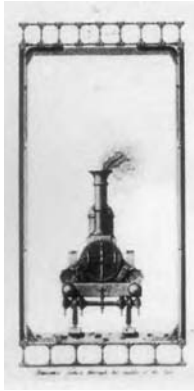
Precisamente en la misma línea en la que estaba el puente de Dee, el propio Stephenson encauzaría pocos años después la tecnología de la construcción con hierro forjado y daría un paso de gigante en el desarrollo y comprensión de los puentes viga en la que fue su obra maestra: el puente tubular de Britannia.

Antes Stephenson construiría en 1849 el High Level Bridge para cruzar el Tyne en Newcastle, en otra de sus obras más sobresalientes. Este paso se llevaba estudiando desde años atrás por su importancia para la conexión entre Inglaterra y Escocia, pero debía cruzar a casi 40 m de altura sobre el río sin perturbar su navegabilidad, lo que obligaba a grandes luces que retrasaron el proyecto. Las vigas de la época no podían salvar la distancia necesaria y los puentes colgantes no se contemplaban como una opción por su falta de rigidez. Sólo quedaba el arco que de hecho fue la tipología que propuso Stephenson en hierro fundido, apoyando sobre pilas de fábrica. Pero éste tenía el problema de los empujes laterales que las pilas necesariamente altas y estrechas no podrían soportar durante la construcción. Cimbrar todos los arcos a la vez no era posible pues impediría la navegabilidad por lo que Stephenson empleo una solución bow-string en la que el tablero de hierro forjado actúa como tirante y soporta el empuje del arco. Con esta tipología de gran sentido estructural, que el mismo Stephenson ya había experimentado con éxito, la reacción en los apoyos del arco es sólo vertical. Otro ejemplo destacado entre los primeros en emplear esta configuración es el puente de Brunel sobre el Támesis en Windsor, de 31 metros de luz, construido en 1849 para un ramal del Great Western Railway, también en 1849. El puente de High Level causó admiración por tratarse además de uno de los primeros que se construían con tableros en dos niveles. El superior para el ferrocarril apoyaba sobre el arco mediante pilares huecos de fundición, a través de los cuales pasaban los tirantes de hierro forjado de los que colgaba a su vez el tablero inferior para carretera y peatones.

Emplazamiento del estrecho de Menai entre Gales y la isla de Anglesey, en el mar de Irlanda.

Grabado y sección del puente de Britannia (1850)





También destacables en este puente son algunas muestras de los desarrollos tecnológicos en la construcción que acompañaban a la evolución de los propios puentes. Las máquinas de vapor para el bombeo del agua de los diques secos necesarios para la ejecución de las cimentaciones habían ganado mucho en capacidad desde las primeras líneas. También fueron mejorando los medios para el hincado de pilotes de madera. El High Level Bridge fue donde se aplicó por primera vez el "Nasmyth's Titanic Steam Hammer" capaz de hincar un pilote 10 metros en el lecho del cauce en sólo 4 minutos. Este puente fue también uno de los primeros que vieron el uso del cemento, todavía en su infancia, que permitió a Stephenson hormigonar el cajón de la cimentación cuando las filtraciones de arenas y limos hacían cualquier otra solución muy difícil.

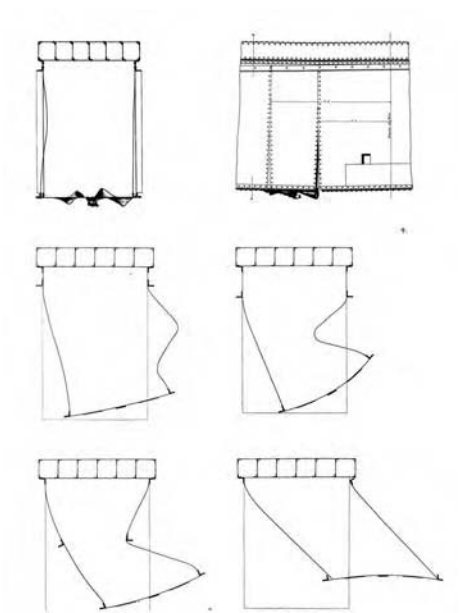
Cuando la Reina Victoria inauguró esta aclamada obra, sin embargo, Stephenson tenía ya puestas todas sus energías en la mayor de sus realizaciones. Ya en 1845 había sido designado como ingeniero jefe de la línea que unía Chester con el puerto de Holyhead, esencial para las comunicaciones con Irlanda. Como Telford 25 años antes, Robert Stephenson tuvo que enfrentarse al cruce del estrecho de Menai donde de nuevo el Almirantazgo se mostró inflexible en sus condiciones para que la altura del puente no disminuyese el gálibo en ningún punto del canal y que, ni siquiera durante la construcción, se dificultase la navegación.

Stephenson sólo podría tener un punto de apoyo para el puente a lo largo del estrecho, por lo que se enfrentaba a salvar una luz de 140 metros que hasta entonces sólo habían salvado los puentes colgantes carreteros. Sin embargo la suspensión no se consideraba una opción para el ferrocarril, y los estrictos condicionantes de navegabilidad proscribían el arco y las cimbras que Robert Stephenson había propuesto en primera instancia, lo que le enfrentó de nuevo al dilema que rara vez había dejado de acompañarle: o innovar o quedarse sentado. Parece que Robert acostumbró a tener claro por qué alternativa optar y por eso hoy sabemos quién fue. Ya en 1845 le contó lo que tenía en mente a su colega Fairbairn: un gran tubo recto y cerrado de chapa laminada por cuyo interior pasaría el tren. Nunca antes se había visto nada semejante. Hoy pocos viaductos de las modernas líneas de alta velocidad dejan de usar este concepto estructural.

Robert Stephenson buscó un emplazamiento a escasos 2 km del puente colgante de Telford en el que una pequeña isla natural en la parte central llamada Britannia facilitó un apoyo intermedio y acabaría dando su nombre al puente. Además de los dos vanos centrales de 140 metros el puente contaba con otros dos laterales de 70 metros y alcanzaba por tanto una longitud de más de 420 m. Su altura por encima del nivel del agua era de 36 metros superando el mínimo de 30 que había impuesto el Almirantazgo.

Puente de Britannia.

Secciones transversales representados los modos de fallo obtenidos en la campaña de ensayos previa a la definición de la sección transversal



Stephenson se enfrentó al diseño del puente sin ningún precedente tipológico y bajo la influencia de la reciente catástrofe del puente de Dee, y por ello no sin albergar ciertas incertidumbres sobre el diseño, del que le preocupó más su completo éxito técnico que su estética o economía.

Estas dudas se irían disipando a lo largo de la construcción merced a la intensa experimentación que se llevó a cabo de forma paralela, pero no dejaron de reflejarse en el resultado final, en particular en el diseño de las pilas, que empezaron a levantarse ya en 1846. Mientras duró su construcción estaba previsto incorporar unas cadenas colgantes, alojadas en sendas aperturas en cabeza de pilas, que colaborarían con las vigas suspendiendo parte de la carga. Las cadenas acabarían por descartarse, pero las pilas estaban ya preparadas para darles apoyo y por eso hoy se levantan monumentales varios metros por encima del tablero sin que ello tenga aparente motivo para el observador desinformado.

Para el análisis y dimensionamiento de la estructura Robert Stephenson formó un grupo multidisciplinar en el que destacaron William Fairbairn y Eaton Hodgkinson. Como hemos visto, ambos habían colaborado ya con Stephenson 20 años antes en la construcción de algunos de los primeros puentes metálicos en la línea Liverpool-Manchester y los dos habían progresado, como Stephenson, en sus respectivas especialidades. El primero era reconocido como uno de los máximos expertos en la construcción con hierro, y en particular en la técnica del novedoso hierro forjado en chapas con el que venía trabajando en la industria naval. El segundo, conocedor de los desarrollos teóricos que encabezaba Navier en la vecina Francia, era considerado una de las máximas autoridades británicas en el análisis de vigas.

Juntos emprendieron una campaña experimental en la que ensayaron vigas huecas de diversas geometrías, circulares, ovaladas o rectangulares, decantándose de forma clara por estas últimas. Se toparon con la inestabilidad de las chapas comprimidas, descubriendo para su sorpresa que, al contrario de lo que sucedía con el hierro fundido, las vigas de hierro forjado fallaban antes a compresión que a tracción. Hodgkinson, que anteriormente había estudiado la inestabilidad de columnas (determinando experimentalmente las constantes a emplear en la fórmula de Euler de 1744) propuso conformar las cabezas del tubo en doble pared formando celdas rígidas y disponer perfiles de rigidización en las almas. En el último modelo a escala 1/6 (22.8 metros de largo, 1.37 metros de canto y 0.81 metros de ancho) fueron progresando por prueba y error incrementando sucesivamente las chapas que fallaban en primer lugar y alcanzando así una proporción que resultaba en una capacidad similar de ambas cabezas, comprimida y traccionada, y de las almas. Fruto de esta experimentación fue también la confirmación de la rigidez e idoneidad resistente de la sección tubular y

Representación de los trabajadores en el interior del cajón del puente de Britannia.

(en página derecha) Fases del proceso de construcción.

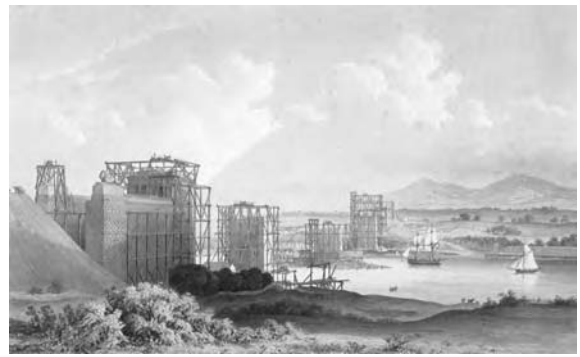
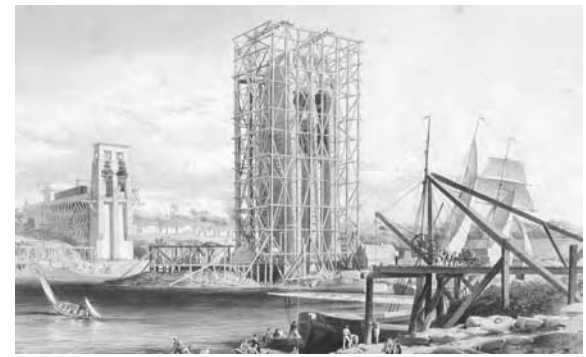
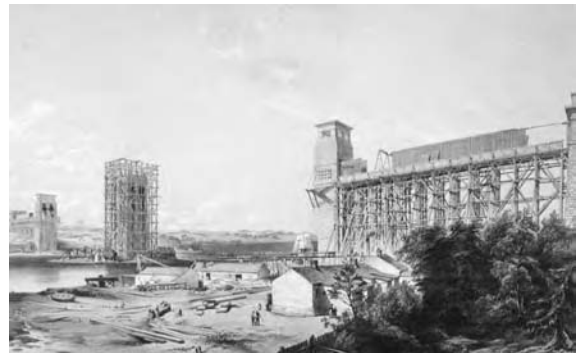
el abandono definitivo de las posibles cadenas de suspensión, por el que Fairbairn fue el primero en abogar.

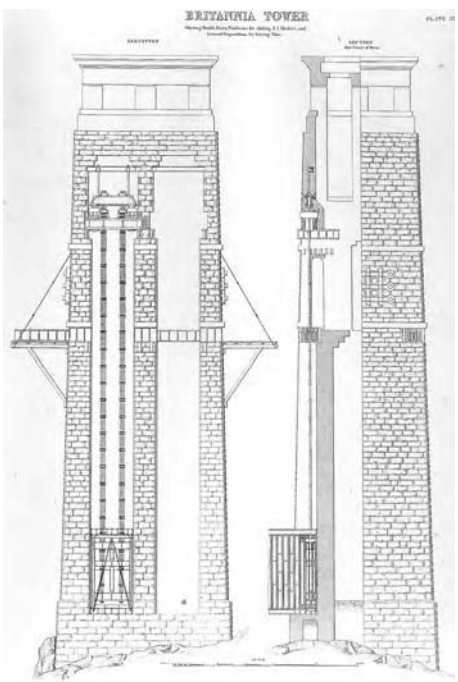
La prueba de fuego la proporcionó en la misma línea el cercano puente de Conway de 1848, igualmente tubular y también vecino de un famoso puente colgante de Telford. Sus 122 metros de luz en un único vano biapoyado fueron también un record para los puentes del ferrocarril y el primer uso con éxito de una viga tubular. Sin embargo, salvando un obstáculo menos trascendente y situado en un entorno más resguardado que el del Britannia, la grandeza del segundo ha ensombrecido en ocasiones lo alcanzado con el primero, pese a que fue un logro anterior y fuente impagable de experiencias.

La sección finalmente escogida para el puente de Britannia tenía un canto de 9 metros y por lo tanto una esbeltez de 1/15.5, similar o incluso superior a la de muchos viaductos en cajón actuales. Los cordones superior e inferior eran en doble pared, lo que dejaba una altura libre en el interior de los tubos de 7.9 metros. El ancho de 4.2 metros era el necesario para el paso de un tren. Las paredes se conformaban con chapas unidas con roblones y, en el caso de las almas en pared simple, rigidizadas con perfiles. Los tubos de más longitud contenían 327.000 roblones, más de 500 por metro cuadrado. Estos se colocaban manualmente o, por primera vez, con maquinaria neumática de roblonado y remachado que Fairbairn desarrolló específicamente para el Britannia.

En total el peso de cada tubo fue de 1.600 toneladas, de las que un 62% se destinó a los cordones y el resto a las almas. Esto arroja una cuantía próxima a los 2.700 kg/m2 que hoy desbordaría cualquier presupuesto y recuerda que en la pudiente Gran Bretaña victoriana y ante la magnitud de un reto que mantuvo al orgullo de todo un país expectante, las máximas de eficiencia y economía estructural dejaron de ser prioritarias ante el imperativo económico y estratégico de poner una línea segura en servicio cuanto antes.

No es de extrañar por tanto que estas vigas acabaran ganándose el apodo de "monster tubes" con el que el mismo Edwin Clarke, designado por Stephenson ingeniero jefe en la obra, se refería a ellas en sus escritos. De los 4 tubos, los dos laterales más cortos pudieron construirse sobre cimbras de madera, pero no sucedía lo mismo con los centrales que no debían interrumpir la navegación. Éstos por tanto tuvieron que construirse en la orilla para ser después flotados e izados hasta su posición. La obra supuso una empresa formidable para cuya descripción, y contraste con las actuales, nada mejor que rescatar las palabras del propio Clarke en 1849:



Esquema del sistema empleado para el izado de los tubos y el hueco provisional previsto al efecto en las pilas de fábrica.

"Hay tres grandes talleres en intervalos a lo largo de las plataformas para los tubos, provistos de forjas y maquinaria de corte, perforación y enderezado de las planchas. Buena parte de la maquinaria es bastante novedosa y ha sido expresamente desarrollada para esta obra. Hay 5 muelles con grúas para la descarga de la piedra, el hierro y otros materiales; 6 motores de vapor se emplean de forma constante para elevar la piedra de las torres, airear fuegos y trabajar con la maquinaria. El número de hombres en el tajo, en pleno rendimiento, promedia los 1.500, 700 trabajando la piedra y los restantes 800 el hierro. La operación de flotación requerirá 700 hombres, la de izado sólo 36. Los accidentes que han ocurrido en la obra han sido afortunadamente poco numerosos. Sólo 7 personas han perdido la vida.

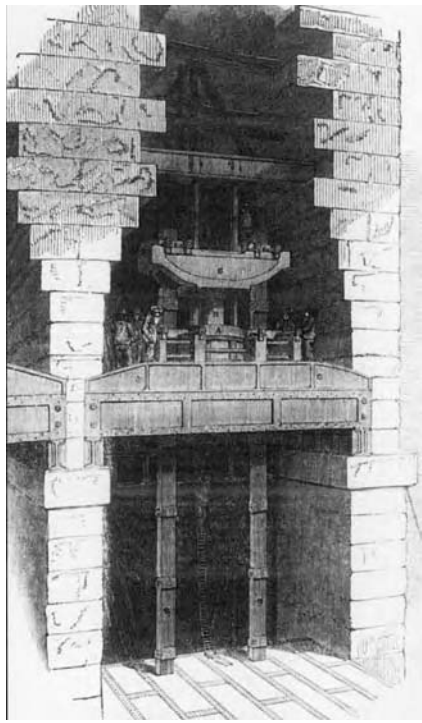
Viviendas provisionales de madera se han levantado sobre el terreno que proporcionan alojamiento a 500 trabajadores y sus familias. Hay tiendas de suministros, cuyos precios han aumentado mucho desde el principio de los trabajos. Tienen también las ventajas de una escuela diaria y un clérigo; un médico está constantemente en la obra en caso de accidentes."[1]

Stephenson se vio forzado por los condicionantes de navegabilidad a construir los tubos fuera de su posición. Hoy con toda probabilidad se hubiese hecho así aunque no se estuviese obligado a ello, pues las ventajas de construir en la orilla son muchas, el ahorro en la cimbra muy importante, y por otro lado la tecnología para el manejo de grandes piezas ha progresado tremendamente. Sin embargo, en la época del Britannia manejar y elevar unas piezas que con los útiles para el izado pesaban 1.800 toneladas suponía un reto sin precedentes y un riesgo tan innegable como inevitable. Tanto es así que el interés que despertó esta maniobra en todo el país obligó a delimitar zonas y preparar tribunas para los millares de observadores que llegaron de todas partes de las islas para presenciarlo, e incluso esto resultó insuficiente pues "cada eminencia del terreno, colina, acantilado o saliente de la costa, en ambos lados del estrecho y casi hasta donde alcanzaba la vista se hallaban abarrotados por una multitud enorme de espectadores que formaban un vasto anfiteatro"[2].

Fueron necesarias 8 grandes barcazas de fondo plano para flotar los tubos, 6 de las cuales se habían empleado ya con éxito en Conway. Iban sujetas por gran número de cabrestantes y calabrotes, aunque para su primera elevación y posterior traslado lo que se hizo fue usar inteligentemente las fuerzas de la marea y las corrientes. Estas barcazas o pontones estaban provistas en cualquier caso de válvulas para la entrada de agua y de bombas para su achique, lo que permitía variar el nivel de flotación según conviniese. Un exceso de agua en el interior podría elevar en demasía el esfuerzo sobre los cabrestantes, y un defecto podría bajar demasiado la línea de flotación y hacer el conjunto inestable frente al viento.

[1] "The Menai Bridges" Gwynedd Archives Service & Welsh Arts Council.

[2] idem. libro.



Vista aérea del puente tubular de Conway para el ferrocarril (1849), de R. Stephenson, junto al puente colgante para carretera, de Telford (1826).

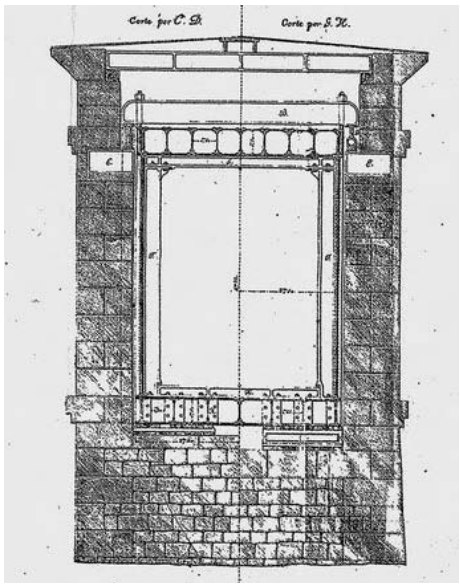
Detalle del mecanismo y cadenas empleadas en el izado de los tubos del Britannia, pocos metros antes de que éste alcance su posición.

En la planificación de la maniobra habían participado todos los grandes ingenieros de la época, y de hecho viajando en el mismo tubo conforme se acercaba a su posición no sólo iba el propio Stephenson y el ingeniero encargado Clarke, sino que también Brunel y Locke, los otros dos grandes nombres de la ingeniería del momento, se mantenían sobre la viga atentos a cada movimiento y dispuestos a prestar su ayuda. La conocida rivalidad entre ellos nunca mermó el respeto que se profesaron ni evitó que se prestasen ayuda ante los grandes retos de uno u otro. No sin dificultades, y tras 3 intentos, la primera viga se posicionó con éxito levantando así el clamor popular. En operaciones sucesivas el resto de tubos la siguieron con similar resultado.

Las vigas debían penetrar obviamente en las pilas una cierta distancia para su adecuado apoyo, por lo que en éstas se había dejado por completar el espacio en la vertical de dicho apoyo para ser rellenado a posteriori tras el izado de los tubos. Los jóvenes ingenieros encargados del izado, envalentonados por el éxito alcanzado en el puente de Conway, pretendían realizar el izado de forma rápida y continuada para luego completar cómodamente bajo el tubo ya posicionado la sillería que le daría apoyo. Stephenson, más experimentado y consciente de lo delicado de la operación, obligó en cambio a realizar la ascensión de forma más lenta y engorrosa, levantando el tubo en cortas fases y posicionando la sillería gradualmente después de cada fase.

Su precaución probó ser acertada cuando en el izado de uno de los tubos un gato hidráulico falló dejando caer la gran viga que se desplomó en uno de sus extremos sobre la piedra colocada en la fase anterior. Pese a que la caída fue de poco más de 20 cm, los daños fueron importantes y, dada la posición del tubo, de muy difícil y costosa reparación, pero la sensación que dejó el suceso fue de gran éxito por haber logrado evitar que ante semejante fallo el tubo completo fuese a dar al fondo del estrecho.

Hasta los puentes de Conway y Britannia, las grandes luces se habían salvado siempre recurriendo a mecanismos resistentes basados en la forma y que permitían soportar las cargas mediante la tracción, en los puentes colgantes, o bien mediante la compresión, en los arcos. Los puentes de Conway y Britannia no sólo salvaron luces nunca antes cruzadas por una locomotora, sino que lo hicieron empleando por primera vez la flexión de un tramo recto en un puente de gran dimensión, y ello cuando los mecanismos internos de la flexión sólo recientemente habían sido resueltos en Francia y en Inglaterra apenas empezaban a ser conocidos. Pese a ello Stephenson hizo gala de una clarividente intuición estructural cuando en el Britannia optó por solidarizar por completo los 4 tramos entre sí conformando de ese modo una viga continua, lo que reducía los esfuerzos y más aún las deformaciones que produciría el paso del tren.



El Britannia no consolidó una solución estructural pero sí inspiró diversos puentes posteriores. Sección transversal en cajón del proyecto no construido para el ferrocarril de Valladolid a Burgos (1852) redactado por Sagasta, después 8 veces Presidente del gobierno español.

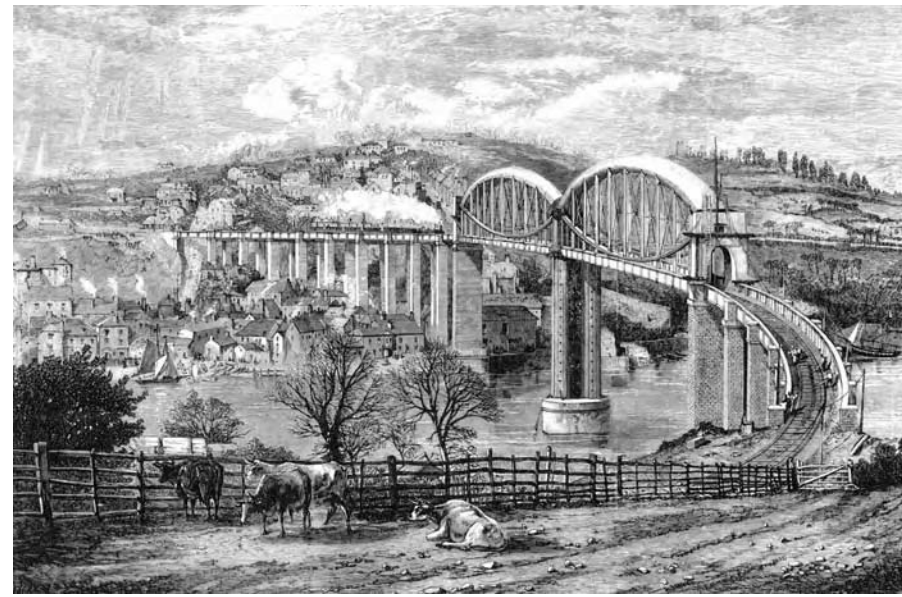
Puente ferroviario de Victoria en Canadá mediante vigas tubulares (1859).

La continuidad aplicada, por otro lado, sólo permitía reducir los esfuerzos debidos a la sobrecarga que actuase después de materializar la unión entre tramos. Los esfuerzos flectores debidos a la mayor parte de la carga, el peso propio, seguirían siendo los correspondientes a los 4 tramos biapoyados, esto es, máximos en centro luz y nulos en apoyos. Stephenson compensó los esfuerzos elevando con gatos el apoyo de la viga continua en la pila central, llevando los momentos hacia ésta y reduciendo los máximos flectores que se daban en centro luz de los vanos intermedios, lo que confirma la clara comprensión del funcionamiento de una viga que ya atesoraba. Con está forma de presolicitar la estructura para adecuarla mejor a los esfuerzos que debía resistir, Stephenson se adelantó significativamente a su tiempo, empleando en 1850 conceptos que no se establecerían hasta bien entrado el siglo XX. El Britannia ilustra como ningún otro la forma en que, particularmente en Gran Bretaña, avanzaba la ingeniería civil de la época, en la que no eran las nuevas teorías las que precedían a los nuevos diseños, sino al revés.

Para dotar al puente de una imagen monumental que resaltase la grandeza de la obra, Stephenson se basó con dudosa inspiración en el referente egipcio, lo que se reflejó en los remates de las pilas y le llevó incluso a disponer sendas esfinges de leones, de 30 toneladas por felino, en cada una de las entradas del puente. La estética final de la obra, a pesar de su magnífica envergadura, no estuvo a la altura de los avances técnicos y estructurales que la hicieron posible, quizás, argumenta David P. Billington, porque el arte estructural no florece cuando el condicionante económico se elimina. Los puentes tubulares de Stephenson se basaron en una detallada experimentación y en una afinada intuición estructural, pero no en una necesidad de minimizar materiales o reducir costes.

El puente de Conway sigue hoy en servicio, pero el de Britannia sufrió un incendio en 1970 y conservando las pilas fue remplazado por un puente arco, ya de uso mixto, que no acertó a recoger la esencia de una obra que fue y es patrimonio de la ingeniería.

Después del Britannia Stephenson construyó algunos otros puentes tubulares en Egipto o Canadá, pero esta tipología probó en seguida ser demasiado costosa y se vio superada por las vigas más ligeras en celosía cuyo dominio, como veremos en el siguiente capítulo, comenzaba ya a extenderse. Sólo la llegada de la soldadura en la 1ª mitad del siglo XX y el progreso en el conocimiento de la abolladura de las chapas rescatarían la solución en cajón cerrado que hoy es profusamente empleada en los puentes metálicos.



Puente de Royal Albert o Saltash sobre el estuario de Tamar para el ferrocarril de Cornwall, obra ferroviaria cumbre de I. K. Brunel (1859).

Pese a que tras su construcción no estableció una solución generalizable, el puente de Britannia supuso en su singularidad un referente obligado para el diseño y construcción de puentes en las siguientes décadas, y podría considerarse el broche de oro a un brillante periodo de innovación, experimentación y evolución en la ingeniería de puentes que tenía su origen en la llegada del tren 25 años antes. Ello requeriría el permiso, sin embargo, de la obra ferroviaria cumbre del otro gran ingeniero que impulsó esta época irrepetible: Isambard Kingdom Brunel y su puente de Royal Albert construido entre 1853 y 1859 sobre el estuario de Tamar, en Saltash, y que hoy sigue en servicio.

Con dos vanos de 135 metros de luz, este original puente que combina arco, suspensión y celosía, permitió a Brunel salvar el mayor obstáculo que retrasaba la finalización de su línea de Cornwall. Como en el caso del Britannia, la necesidad de grandes luces y alturas se derivaba de las condiciones de navegabilidad, pero en este caso Brunel no contó con una ayuda similar a la que la pequeña isla de Britannia en medio del estrecho de Menai había prestado a Stephenson. Más bien al contrario, el lecho del cauce, en el que debía inevitablemente disponerse un apoyo, se encontraba a no menos de 25 metros de profundidad en lo que suponía, más allá incluso que las amplias luces, la mayor problemática del proyecto.

Puente ferroviario de Chepstow sobre el río Wye (1852), antecedente del puente de Saltash.

Para solucionarla Brunel, que además de la mayor línea de ferrocarril diseñó también los que fueron los mayores barcos del mundo, ideó un gigantesco cajón cilíndrico hermético con un diámetro de 11.5 metros y una altura de cerca de 28 m, que flotó para hundirlo después en la posición de la pila. El cajón metálico contaba con un cilindro interior menor y también cerrado del que, inyectando aire a presión, se podía expulsar el agua para permitir la entrada de los hombres. Éstos accedían ya en seco a un recinto perimetral en el fondo del cauce, desde el que fueron excavando hasta alcanzar el lecho rocoso. Tierra y barro se extraían a través de cámaras de aire por las que a su vez se introducía la piedra para ir levantando la pila, cuya construcción se prolongó durante más de dos años.

El puente de Royal Albert tenía una luz de 135 metros, 5 metros más corta que la del Britannia, pero como arco, si se quiere clasificar como tal, era el mayor del mundo. La superestructura se construyó empleando sólo hierro forjado. El tubo superior a compresión estaba rigidizado interiormente y tenía geometría ovalada, óptima para el trabajo a compresión, con un eje vertical de 3.10 metros y uno horizontal de 5.15 metros. Los tirantes en forma de catenaria estaban formados por una sucesión de varias chapas largas anudadas con pasadores para formar 2 grandes grupos de cadenas. La flecha de los arcos y los tirantes era aproximadamente de 9.5 metros, o si se prefiere el canto de la viga lenticular era de 19 metros. El tablero, formado por vigas de alma llena, colgaba del arco y las cadenas mediante potentes perfiles verticales. El conjunto se rigidizaba longitudinal y transversalmente por finas barras de hierro forjado que triangulaban la estructura y la hermanaban con la de una viga en celosía.

Al igual que el Britannia tuvo el puente de Conway como valiosa experiencia previa, Brunel había experimentado también una tipología que antecedía a la de Saltash en el puente de Chepstow, con 91 metros de luz y concluido en 1852. También en este puente usó unos grandes tubos superiores ligeramente curvados trabajando a compresión y unas cadenas inferiores resistiendo a tracción. Fue el primer puente en el que experimentó el uso de un cajón con aire a presión para la construcción del cimiento. Hoy probablemente clasificaríamos este puente como una gran viga, aunque entonces esta obra de Brunel llegó a describirse como un puente colgante en el que se resistía el tiro horizontal de las cadenas mediante un tubo que actuaba como gran puntal a compresión. Esta diversidad de interpretaciones, de las que ninguna es más cierta que las demás, no es una excepción entre las innumerables obras del genial ingeniero que, como en una constante, tendieron siempre a escapar de clasificaciones preestablecidas.

Si bien en Chepstow Brunel contaba con dos tubos que poder solidarizar transversalmente entre sí, en Saltash las presiones financieras llevaron a hacer el puente de

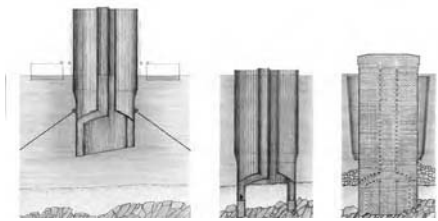
una única vía, con lo que el gran tubo comprimido pasó a quedar exento. Consciente del riesgo de lo que hoy llamamos pandeo lateral, Brunel pasó de una geometría circular a una en óvalo tumbado para ganar rigidez transversal y al mismo tiempo reducir el empuje del viento.

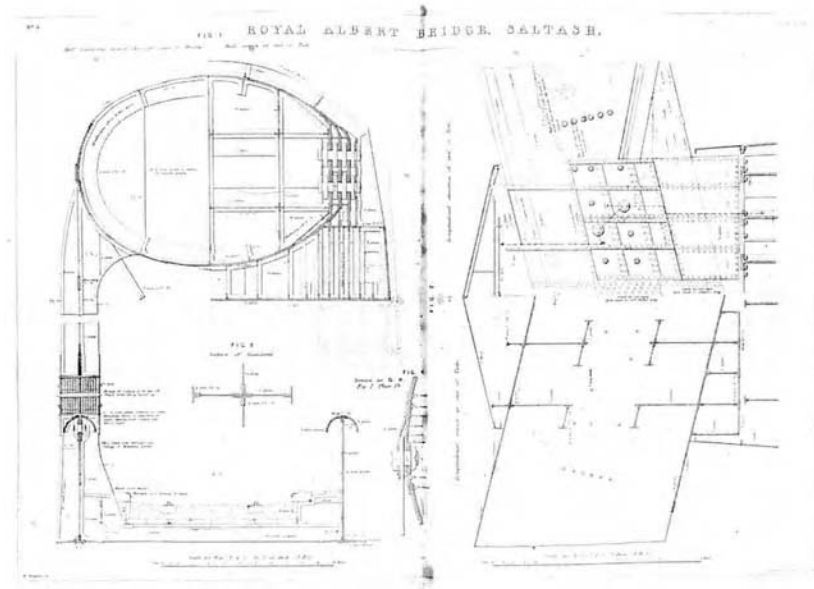
Como en el Britannia, mientras los cimientos y bases de las pilas se construían, las dos grandes vigas del puente de Saltash se fabricaron en la orilla para ser posteriormente flotadas y elevadas con gatos hidráulicos a su posición. También por ello era imprescindible que el arco superior fuese autoestable, quedando sus empujes horizontales recogidos internamente por las cadenas en todo momento, de tal manera que en sus apoyos sólo requiriese reacciones verticales. Con un peso de 1.000 toneladas, las vigas se apoyaban tras su flotación sobre la base de las pilas, cuyo fuste se fue construyendo conforme las vigas se elevaban. Esto se hizo en fases, alternando elevaciones de 90 cm en cada extremo. Tras cada fase de izado las vigas se apoyaban sobre soportes provisionales que permitían la construcción de la propia pila. Las dos vigas tuvieron que elevarse por turnos para en ningún momento interrumpir la navegación, lo que hizo que la operación durase más de un año durante el que, víctima de un ataque repentino, Brunel falleció. Tenía sólo 53 años que fueron suficientes para dejar tras de si una obra de una magnitud, variedad y genialidad como nunca un hombre solo había creado, ni probablemente, haya vuelto a crear.

Puente de Royal Albert, grabado del proceso de izado de la segunda gran viga.

Esquema del proceso de ejecución de la cimentación mediante un cajón hincado.

Plano de detalle del tubo superior.





(en página derecha) El ferrocarril de Cornwall se dispone a cruzar por el puente de Saltash.

Brunel no llegó a presenciar la inauguración del puente por el príncipe Albert en 1859, pero había vivido ya su particular baño de multitudes en la flotación de la primera gran viga, desde cuya coronación él mismo dirigió la operación ante la atenta mirada de miles de espectadores. Cuando la viga pasó a descansar sobre las bases de sendas pilas, la multitud silenciosa explotó en alabanzas al tiempo que la banda real empezaba a tocar "Hail the Conquering Hero Comes". Quien investigue sobre la construcción de puentes en esta época se sorprenderá de la frecuencia con la que esta melodía se menciona al describir la culminación de las grandes obras, lo que lleva a la sospecha de que la variedad de la música triunfal británica no estuvo a la altura de la de sus puentes.

Siendo obras de la misma época y con luces parecidas, ha resultado inevitable que se haya tendido a comparar el Britannia y el puente de Saltash. Ya sea entendiendo el diseño de Brunel como una combinación de arco y barras en suspensión, o bien, interpretándolo como una gran viga de canto variable con cabezas a compresión y tracción, no cabe duda de que en el puente de Saltash, al trabajar por forma, es posible emplear el material más eficientemente que en una solución en tramo recto como la del Britannia, en la que la forma no se adapta a los esfuerzos actuantes, lo que lleva a disponer una importante cantidad de material donde no es estrictamente necesario. El paso a un uso más eficiente del material es una ventaja "al cuadrado", pues al reducir medición se reduce al tiempo el peso propio que el puente debe soportar.

Como contrapartida, el tramo recto del Britannia tiene la ventaja de que la propia estructura resistente materializa la plataforma para el paso del tren, mientras que en Saltash resultó necesario añadir todo un tablero que cuelga de la estructura resistente sin colaborar en la flexión general (por ello estas soluciones lenticulares acabarían derivando hacia el arco bow-string, en el que se renuncia a la flecha del tirante inferior pero a cambio éste puede pasar a actuar como tablero). Como muestra de un mejor aprovechamiento del material en la solución más imaginativa de Brunel se han comparado en ocasiones los 10.400 kg de hierro por metro de puente del Britannia con los menos de 7.000 kg/m del puente de Saltash, aunque esta comparativa obvia el que el primer puente fuese de doble vía y el segundo de vía única.

Ambas obras forman parte de la historia más brillante de la ingeniería y fueron un referente obligado durante años. Supusieron sin duda una contribución definitiva a la confirmación del metal como material de referencia para los grandes pasos e inspiraron varios futuros puentes, pero ninguna ofreció un modelo generalizable. La tipología que por su sencillez, eficacia y economía habría de establecerse, para reinar en toda la segunda mitad del siglo XIX, estaba llegando por otras vías, aunque eso forma parte ya del siguiente capítulo.

Aunque no destinado al ferrocarril, al hablar de Brunel no puede dejar de mostrarse el Puente de Clifton en Bristol, junto con el de Saltash su mayor y predilecta realización. Ello puede a la vez servir para comprobar como también en el siglo XIX los obreros dejaban a veces de ponerse el casco.

I.K. BRUNEL

2. Segunda mitad del s. XIX. Los puentes del tren tienen alma de hierro

2.1 Introducción

Los primeros ingenieros del tren tenían lógicamente toda una red que construir, y entre las numerosas conexiones demandadas, aquellas con los mayores obstáculos orográficos habían tendido a relegarse. Sin embargo, entrados en la segunda mitad del siglo XIX el ferrocarril había tenido un desarrollo tan rápido y la demanda era tal que los ingenieros se vieron empujados a buscar soluciones que les permitiesen enfrentarse a discontinuidades críticas en la red, en forma de profundos valles o anchos estuarios, cuyos pasos ya no era posible posponer.

Cuando permitió la conexión con el puerto de Holyhead a través del estrecho de Menai, anhelada desde los primeros días del ferrocarril, el puente de Britannia proporcionó el primer gran logro de esta fase, cuya culminación en Gran Bretaña podría situarse a finales del siglo XIX cuando el paso del tren sobre los estuarios de Tay y Forth completó en la costa este las decisivas pero hasta entonces impedidas líneas hacia el norte. El desarrollo de los puentes enmarcado entre ambos hitos configura el grueso del presente capítulo.

Curiosamente el mismo ferrocarril, que con su incesante y exigente demanda de puentes cada vez mayores configuraba el enunciado del problema, fue también parte activa de la solución al ser pieza imprescindible en el desarrollo de la siderurgia. El hierro trajo la bomba de vapor, la bomba de vapor trajo más carbón y el ferrocarril, y éstos trajeron a su vez más hierro espoleando así, al proporcionar al mismo tiempo la necesidad y el modo de satisfacerla, una época de auge constructor de puentes que se prolongaría hasta finales del siglo XIX.

Las obras del ferrocarril, en otro ejemplo de cómo este proceso se retroalimentó, colaboraron también a asegurar el suministro de hierro al ser con frecuencia artífices del hallazgo de nuevos yacimientos de minerales férricos en las excavaciones de desmontes y túneles. En Inglaterra, por ejemplo, las primeras líneas en la zona llevaron al gradual descubrimiento del gran yacimiento que se extiende entre Tees y Weymouth. También es un ejemplo el macizo central francés en el que se fueron descubriendo más recursos mineros a raíz de las líneas que se tendieron para el transporte de los ya conocidos.

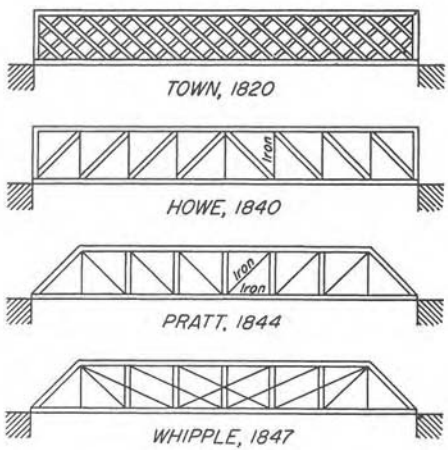
Junto con el progreso de la siderurgia en la industria, que abarató el hierro y llevaría al acero, la solución para una demanda de tantos y a menudo tan grandes puentes habría de llegar de la mano del desarrollo de la triangulación que llevaría al dominio de la celosía, ya fuese en forma de viga, pilar o arco. Puede entenderse que ello marca el fin de un periodo, el de los primeros puentes del tren, en el que convivieron muy diversas tipologías y todos los materiales, para pasar a otro en el que el progreso de los grandes puentes pasa a contar con un material y un modo estructural generalizados. El alma de los puentes del tren se hace de hierro, de hierro triangulado.

Los trenes de la Southern Pacific Route hicieron parte del viaje en ferry para cruzar el Mississippi durante más de medio siglo, hasta que fue posible la construcción de un puente para la conexión con Nueva Orleáns.

La triangulación aplicada en la viga o el arco. Puentes sobre el río Fraser para el Canadian Pacific Railway (1910-1915).

Esquemas básicos de los más comunes tipos de celosía.

Celosía tipo Town de hierro forjado en el puente de Fort Wayne sobre el río Allegheny, para el Pittsburg&Chicago Railway (1867).



2.2 Celosías

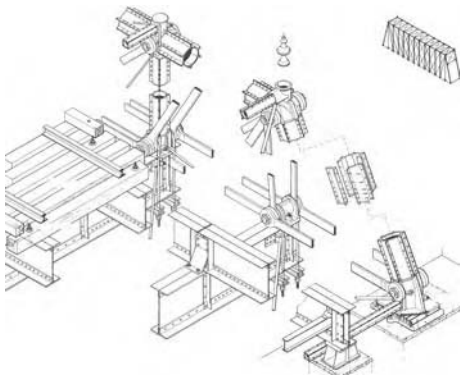
En la esencia de la celosía esta el concepto de la triangulación, siendo el triángulo el único polígono cuya geometría solo puede variarse modificando la longitud de sus lados. Conceptualmente, por tanto, las celosías trianguladas resisten liberando a sus barras de los exigentes esfuerzos flectores o cortantes, de forma que sólo estén solicitadas por los esfuerzos más puros, de tracción o compresión.

Las vigas en celosía tuvieron un fulgurante desarrollo a mediados del siglo XIX; y las siguientes décadas, hasta ya entrado el siglo XX, vieron la época dorada de esta tipología que fue rápidamente acaparando la construcción de puentes. Las celosías permitían un gran aprovechamiento del material en eficaces soluciones de gran ligereza y facilidad constructiva. Esto unido al desarrollo del hierro y la consolidación del acero en el último tercio de siglo posibilitó la construcción de grandes viaductos con una rapidez y economía de construcción que hubiese resultado impensable en la primera mitad de siglo.

El origen de la celosía está como hemos visto en las estructuras de madera, que tienen que componerse inevitablemente de elementos alargados de longitud limitada unidos entre sí. No es de extrañar, por tanto, que el desarrollo inicial de esta tipología se diese en los Estados Unidos donde por entonces la madera era el material por excelencia.

Como hemos visto al hablar de los puentes de madera, la primera patente de vigas en celosía fue la de Town en 1820 con su característica alma cerrada en celosía múltiple. El ferrocarril, cuyas primeras líneas norteamericanas datan de la década de los 30, fue la mecha que encendió su rápida evolución. En 1840 se patenta la viga Howe, celosía abierta de madera con montantes verticales en tracción y diagonales cruzadas en compresión que jugaría un papel protagonista en la construcción de puentes viga a lo largo de todo el siglo; esta solución supone una importante evolución que simplifica la estructura e incorpora por primera vez elementos de hierro forjado para los montantes del alma que trabajan a tracción.

En 1841 el neoyorquino Squire Whipple, uno de los ingenieros que más contribuyó al desarrollo de la celosía, patenta su solución de viga triangulada con cordón superior curvo en arco, y cordón inferior recto que recoge a tracción los empujes del arco y materializa al mismo tiempo el tablero. Esta solución, que se ha utilizado por doquier y hoy llamamos bowstring, combinaba eficazmente los mecanismos resistentes del arco y la viga; en realidad, como hemos visto, ya la había empleado con éxito Robert Stephenson desde 1836 usando un arco de fundición y cadenas de hierro forjado como tirantes, pero los ingleses eran menos dados a la patentes cuya fiebre se desataría en los Estados Unidos.



Celosía siguiendo el esquema de la primera patente de Whipple para el paso del ferrocarril sobre el Big Warrior River (1887). Celosía según la segunda patente de Whipple en el puente de Hayden sobre el río McKenzie, para el ferrocarril de Weyerhaeuser (1882). Detalles de conexiones y nudos.

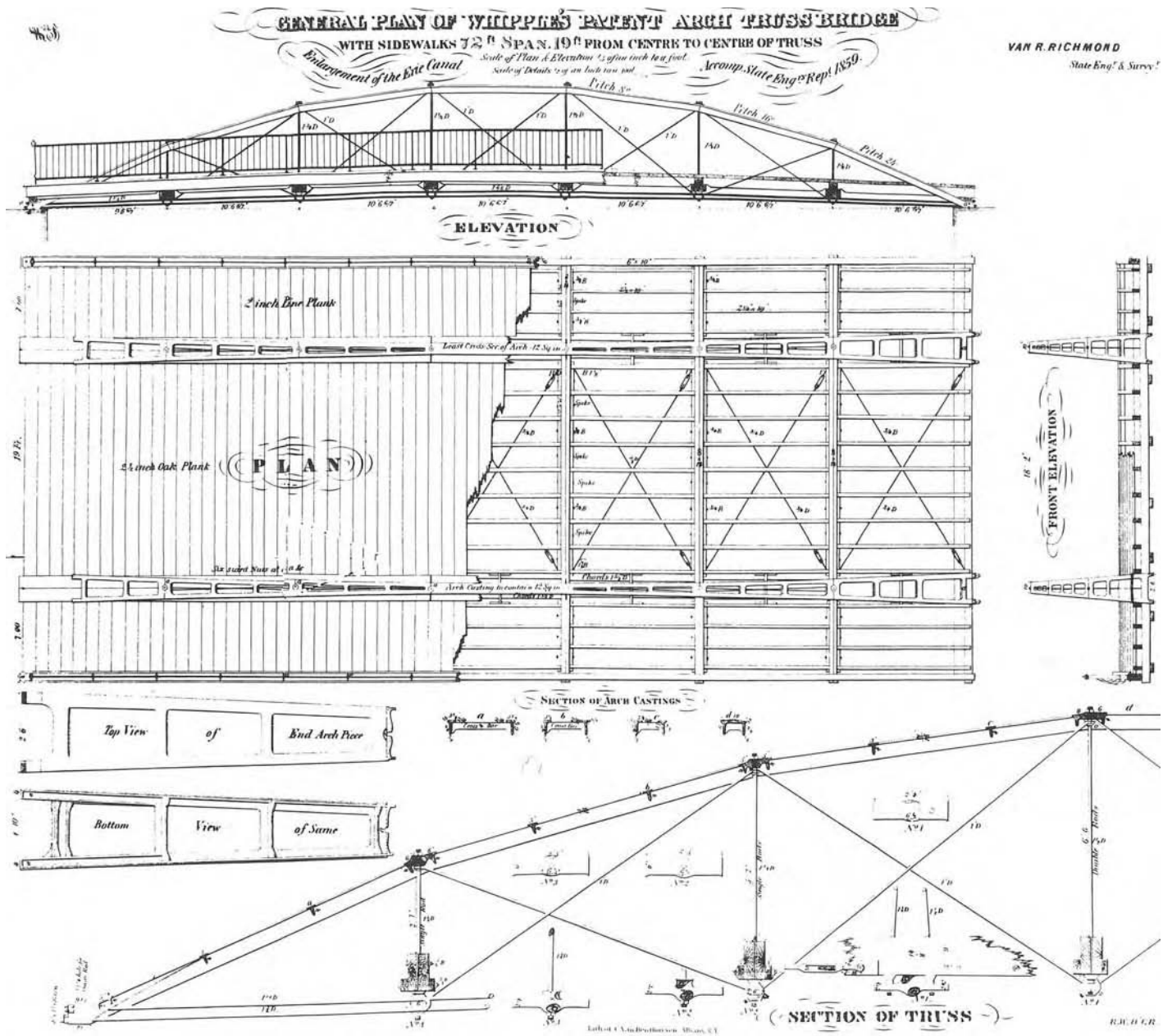
(página derecha) Plano de la primera patente de Squire Whipple (1841).

Pocos años después, en 1844, los hermanos Thomas y Caleb Pratt patentan otro modelo mixto que invertía la viga Howe empleando montantes verticales de madera a compresión y diagonales de hierro forjado a tracción. La viga Pratt es en realidad una solución más eficiente desde un punto de vista estructural pues permite que sean los elementos más cortos los que trabajan a compresión reduciendo así las longitudes de pandeo y se mantiene hoy como una de las soluciones más comunes.

Ambos tipos de vigas mixtas, y aún otros, se emplearon profusamente, siendo sólo cuestión de tiempo el que los elementos de madera pasasen a ser también de hierro. Paralelamente se fue pasando también a emplear una única diagonal en lugar de la doble diagonal en cruz de San Andrés de las primeras versiones. Las soluciones en celosía americanas no tardaron en conocerse en Europa, gracias a los viajes a través del Atlántico de ingenieros como el inglés Stevenson o el alemán Cullman. El viejo continente percibió rápidamente su potencial y fue de hecho donde más marcadamente se propició el paso a soluciones exclusivamente metálicas con el consiguiente aumento en las posibilidades de esta tipología. En Europa, donde la siderurgia todavía llevaba cierto adelanto y era más accesible, y donde la disponibilidad de madera era menor que en norteamérica, fue un paso natural el emplear las soluciones ya desarrolladas sustituyendo simplemente los elementos de madera por perfiles metálicos.

En Estados Unidos, en cambio, el uso de la madera se prolongaría durante más tiempo aunque ya en 1845 Richard Osborne construyó una celosía Howe con todos sus elementos de hierro para el ferrocarril de Manayunk en Peensylvania. En 1847 Whipple obtiene la patente para su celosía enteramente metálica con un modelo análogo al de la viga Pratt con montantes verticales en compresión, de fundición, pero en el que las diagonales a tracción, de hierro forjado, eran dobles en la parte central y se inclinaban para unirse a los cordones superior e inferior cada dos montantes. Sólo un año más tarde, en 1848 y ya en Europa, se patentó la viga Warren, que emplea diagonales inclinadas simétricamente que van alternando esfuerzos de tracción y compresión. Es una solución de gran claridad formal que probablemente sea la más empleada hoy en día. En ocasiones se le añaden montantes verticales que empañan quizás dicha claridad y no contribuyen a la flexión general, pero que permiten reducir la luz a flexión del cordón que sustenta el paso del tren y dividir la longitud de pandeo (en el plano de la celosía) del cordón comprimido.

La viga Warren supone probablemente la culminación en la evolución simplificativa de la celosía, aunque le siguieron ya entrados en la segunda mitad del siglo XIX numerosos nuevos modelos americanos que podrían entenderse como un paso atrás en la simplicidad formal y constructiva de las vigas pero que nos dejaron espléndidos puentes con muy variadas formas de triangulación. El funcionamiento del alma todavía no se


GENERAL PLAN OF WHIPPLE'S PATENT ARCH TRUSS BRIDGE
WITH SIDEWALKS 72 ft SPAN. 19 ft FROM CENTRE TO CENTRE OF TRUSS
Enlargement of the Erie Canal
Accomp. State Eng.r Rep.t 1859.
VAN R. RICHMOND
State Eng.r & Surv.r
ELEVATION
2 inch Pine Plank
2½ inch Oak Plank
PLAN
FRONT ELEVATION
SECTION OF ARCH CASTINGS
Top View of End Arch Piece
Bottom View of Same
SECTION OF TRUSS

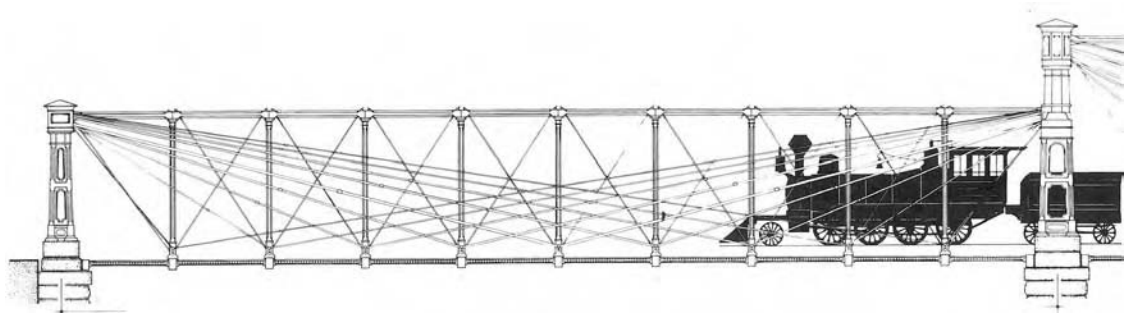
Puente de Stewartson en Pittsburg, en el límite para prescindir del arriostramiento transversal superior sin riesgo de pandeo lateral de la cabeza comprimida de las vigas (1870). Celosía tipo Bollman del Baltimore&Ohio Railroad (1852).

Alzado de la celosía tipo Bollman sobre el río Potomac en Harpers Ferry.

dominaba y muchos ingenieros eran reticentes a emplear soluciones tan abiertas como la de la viga Warren, que por otro lado era una solución propuesta en Europa y por lo tanto menos conocida al otro lado del atlántico. Entre las soluciones posteriores americanas son diversas las que no están carentes de interés y fueron empleadas profusamente. Sin pretender recogerlas todas sí cabe destacar algunos ejemplos como las de los ingenieros del ferrocarril entre Baltimore y Ohio Wendel Bollman y Albert FInk, que en los años 50 tuvieron un éxito significativo aunque efímero.

En la viga Bollman, patentada en 1851, se atirantaba la base de cada montante con diagonales unidas a los montantes de los extremos, proporcionando a la carga un camino directo hacia los apoyos. El atirantamiento inferior de los montantes sería sin embargo llevado a su extremo en la viga Fink, patentada en 1854, en la que incluso se llegaba a eliminar el cordón inferior y la carga que recibía cada montante era recogida sólo por diagonales o tirantes que la transmitían a los apoyos o a la cabeza de montantes vecinos. Aunque constructivamente complejas por los numerosos cruces entre barras, ambas soluciones han generado puentes de gran interés formal. Menos conocida es la celosía de Herman Haupt que fue ingeniero jefe del ferrocarril de Pennsylvania entre 1848 y 1856 y construyó algunos de los primeros puentes de ferrocarril enteramente metálicos. Su modelo viene a ser una combinación de una viga Pratt y un arco bowstring

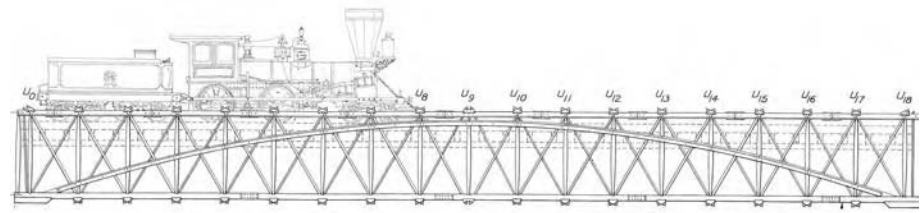
Ya en los años 60 y 70 destaca la obra de John H. Linville que trabajo fundamentalmente en Ohio donde el 1877 terminó el puente de Cincinnati con una luz de 157 metros que fue entonces record del mundo. La viga Linville se llama también en ocasiones doble Pratt porque consiste en dos celosías tipo Pratt superpuestas con diagonales dobladas en el centro de vano. Es esencialmente análoga a la viga Whipple de 1847 ya mencionada y cuyas mayores y más destacadas aplicaciones se deben a G.S. Morison ya en los años 80.

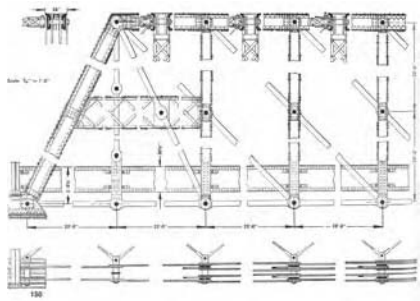


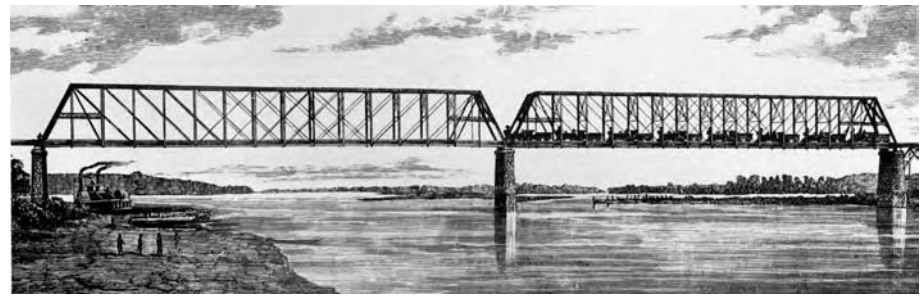
Alzado de celosía tipo Haupt en Pennsylvania (1854). Detalles y alzado de la celosía tipo Whipple del puente de Old Plattsmouth para el cruce del Chicago&Quince Railroad sobre el río Missouri (1880).

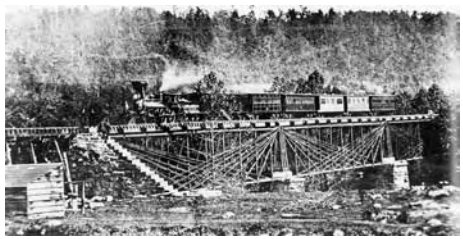
Celosía tipo Bollman del Baltimore&Ohio RR en Maryland (1850's). Celosía tipo Fink.

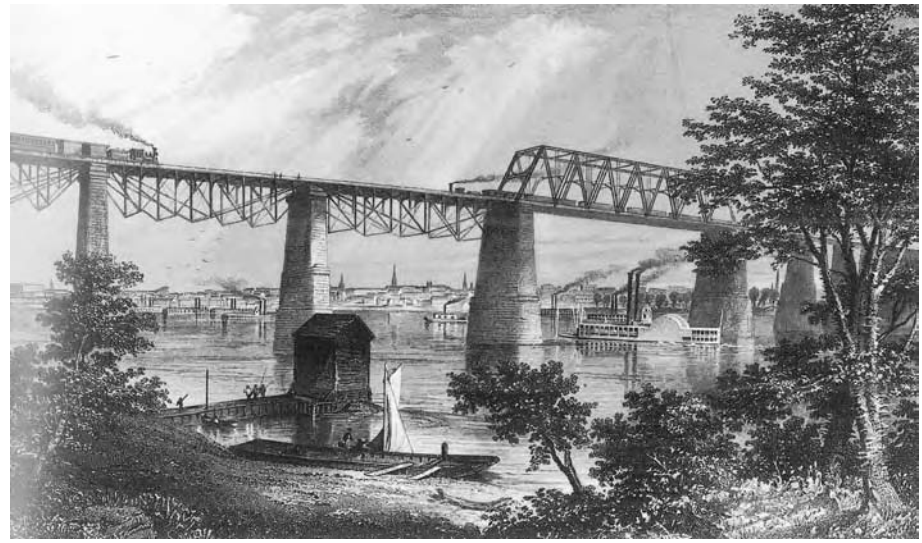
(inf. dcha) El puente sobre el río Ohio para el Pennsylvania RR fue la mayor obra de Albert Fink, con celosías tipo Fink de 55 metros y vanos principales de más de 120 metros (1870).









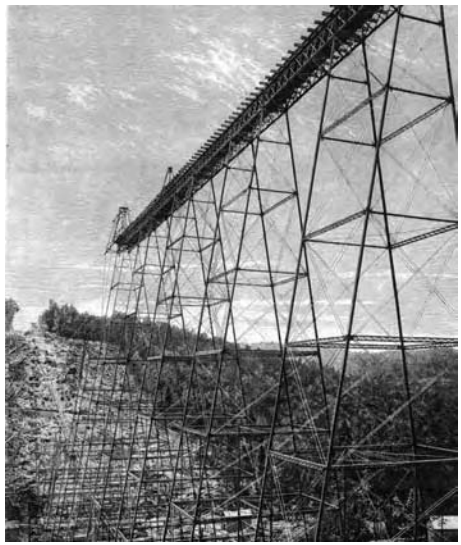


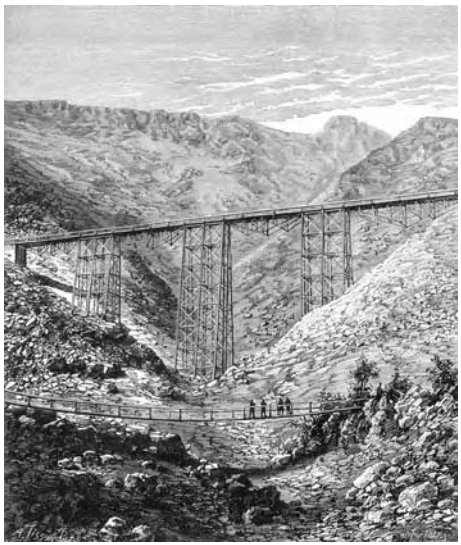
Viaducto de Kinzua en proceso de construcción por voladizos desde los que se descuelgan los elementos de las pilas (1881).

Viaducto de Verrugas en Perú, con cortas celosías tipo Fink entre las anchas pilas.

Viaducto de Leth sobre el valle canadiense del Old Man River, Alberta (1909).

Por entonces la madera prácticamente se había abandonado como material en la construcción de puentes, aunque algunos de los viaductos metálicos americanos presentan claras reminiscencias de las tradicionales y tupidas palizadas de madera tan abundantemente empleadas en los inicios del ferrocarril en dicho continente. Con luces que apenas superan el ancho de las pilas, los famosos viaductos de Verrugas (Perú, 1872), o Kinzua Creeck (Alton, Pennsylvania, 1881) son magníficos ejemplos de esta tipología a la que se tendía cuando el puente debía ser de gran altura. El extremo fue alcanzado en 1909 por el viaducto de Lethbridge, de la Canadian Pacific en Alberta, que con vigas de 30 metros entre pilas, sólo 10 metros más cortas, fue con 1.624 metros uno de los mayores viaductos del mundo.





Celosía tipo Town del puente de Dirschau con 6 vanos de 131 metros (línea Berlín-Königsberg, 1850-57).

Viaducto de Douarnenez durante su lanzamiento.

Construcción por empuje del puente de Collognes sobre el río Saône, obra de Eiffel (línea Paris-Lyon-Meditarraneo, 1887).

Viaducto de Grandfey en la línea de Bern-Laussanne, a 80 metros de altura sobre el fondo del valle (Suiza, 1857)

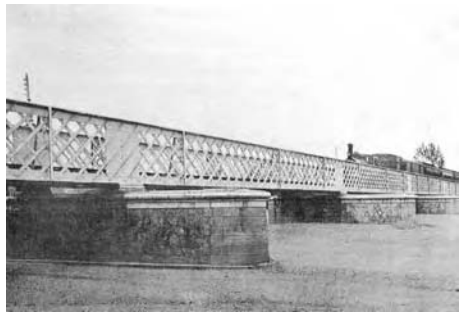
Llegados a este punto conviene volver la vista atrás hacia Europa donde, como ya hemos dicho, se siguió atentamente la evolución de las primeras celosías en Estados Unidos. Curiosamente ingenieros de referencia como Stephenson recibieron con poco entusiasmo e incluso escepticismo las soluciones en celosía, lo que retrasó su desarrollo en Inglaterra. Serían los irlandeses, cuya masiva emigración al nuevo mundo facilitó la transferencia de experiencias, los que antes levantaron en Europa puentes ferroviarios en celosía. Los primeros probablemente fuesen los puentes de Rahery Road (1843) y Royal Canal (1845) en la línea Dublín-Drogheda, con una celosía múltiple muy cerrada siguiendo el modelo de la viga Town.

Suizos, alemanes y belgas siguieron rápidamente esta tendencia con magníficas realizaciones de los años 50 y 60 para sus crecientes redes ferroviarias, en donde aparecerían los primeros grandes viaductos para el tren. Lo atestiguan realizaciones como las suizas del Sitter (1856) y Grandfey (1862), o las alemanas de Dirschau (1857) sobre el Vístula y Waldshut-Tiengen (1859) sobre el Rin. Generalmente empleaban soluciones basadas en la celosía tipo Town con almas de celosía múltiple, en ocasiones tan densa que los puentes se asemejan más a la solución tubular del Britannia que a una celosía.

Este empleo de la celosía múltiple en el alma venía impuesto en muchos casos por un pionero sistema constructivo desarrollado en esta época, el empuje del tablero, que hoy sigue siendo uno de los más usados para los grandes viaductos de ferrocarril. Este sistema fue revolucionario en particular para la construcción de los viaductos de mayor altura o sobre cauces importantes, en los que poder prescindir de las costosas cimbras resultó enormemente ventajoso.

Celosía tipo Town sobre el río Besós (línea Barcelona-Mataró, 1850). Celosía tipo Pratt del viaducto de Alcolea (línea Alcazar-Sevilla, 1859). Viaducto de Ormaiztegui (Madrid-Irún, 1863).

(dcha.) Construcción por empuje del viaducto de Scorff (línea Nantes-Chateaulin, 1860-62).



En los puentes en celosía empujados, el tablero se construía en uno de los estribos y era gradualmente empujado sobre las pilas, con la ayuda de rodillos, a su posición definitiva. Tras superar una pila, la punta de avance del tablero quedaba lógicamente en voladizo hasta alcanzar la siguiente. Para reducir los esfuerzos y deformaciones en esta situación pésima se empleaban pilas provisionales intermedias, atirantamientos también provisionales del extremo del tablero o puntas de avance ligeras que permitían alcanzar antes la pila. Todos estos medios, introducidos por los suizos y especialmente perfeccionados por los franceses en el último cuarto del siglo XIX, se siguen empleando hoy en día.

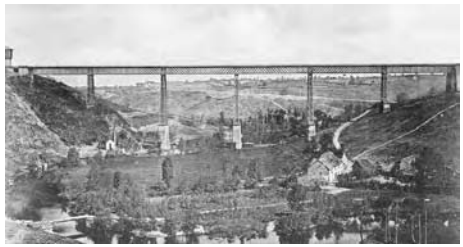
Durante el empuje, lógicamente todos los puntos del cordón inferior se convierten en algún momento en puntos de apoyo sobre pila, por lo que es imprescindible que la distancia entre nudos del cordón inferior sea suficientemente reducida. Esto hacía desaconsejables las soluciones con celosías abiertas, que además proporcionaban menor rigidez y podían acumular excesivas deformaciones parásitas en la zona de pilas que, hoy sabemos, se deben fundamentalmente al cortante. De ahí que muchos de los primeros grandes viaductos tuviesen tupidas almas en celosía múltiple.

También en España hubo destacables ejemplos tempranos de celosías, como el puente del Besós en celosía metálica tipo Town de la primera línea Barcelona-Mataró, que se construyó en 1850 sustituyendo al primero de madera que fue arrastrado por una riada. Otros puentes en celosía que destacan entre los construidos en estos primeros años son por ejemplo los de Alcolea o el del Guadalquivir, de 1859, en la línea de Alcázar de San Juan a Sevilla, el de las Rochetas de 1863 en la línea Lérida-Reus, el de Lagartera, de 1864 en la línea Madrid-Irún, y en particular el de Ormaiztegui de 1863 en la misma línea, con una longitud de 290 metros y vanos centrales de 50 metros. Sufrió daños importantes durante la guerra civil tras los que se le añadieron pilas intermedias de hormigón que dividen la luz de los vanos, lo que permitió que se mantuviese en servicio hasta que recientemente fue sustituido por un viaducto de hormigón. Ingenieros y talleres franceses lideraron la construcción de este magnífico viaducto.

Viaducto de Busseau d'Ahun, sobre el valle de Creuse (línea Montluçon-Limoges, 1863-1864).

Puente con vigas laterales de alma llena sobre el Jarama (línea Madrid-Aranjuez, 1859).

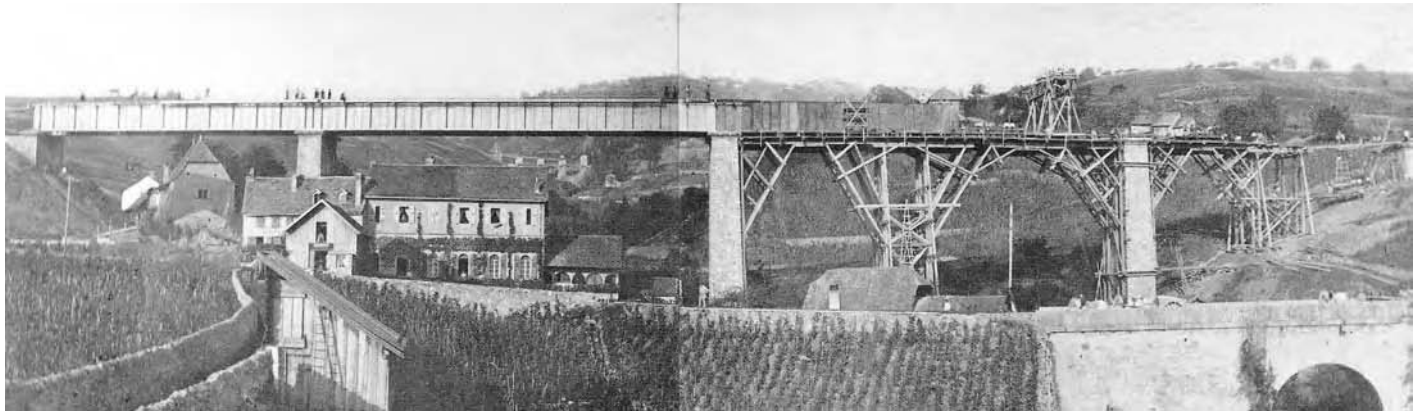
Construcción del viaducto de Paudeze (línea Sion-Lausanne, 1858-1860).



Francia tardó más que el resto de países centroeuropeos en emplear la celosía y de hecho la primera relevante no se construiría hasta 1857; el despertar de esta tipología fue sin embargo explosivo, como ejemplifican realizaciones como la del viaducto de Busseau-sur-Creuse, con un tablero muy similar al de Ormaiztegui y también de 1863, pero con pilas más altas y metálicas. Anterior incluso es el viaducto del Garona, que con 500 metros de longitud salvó dicho río en la ciudad de Burdeos para su conexión ferroviaria con Orleans. Los vanos centrales sobre el río alcanzaban ya una luz de 77 metros. Fue el primer puente metálico en el que un todavía joven Gustave Eiffel participó. Los grandes viaductos en celosía franceses no tardarían en estar a la cabeza de Europa.

En Francia e Inglaterra donde el establecimiento de la celosía fue más tardío, se prolongó el uso de las vigas de alma llena que tenían a los puentes de Conway y Britannia como referencia. En Francia, se levantaron numerosos puentes con vigas de alma llena a los que los actuales puentes mixtos bijácenos para el TGV parecen evocar. Entre estas obras, las de Flachat son las más sobresalientes. En España, la industrialización fue como es sabido más lenta y la mayor parte del material ferroviario se importaba, lo que no ayudó precisamente a corregir esa situación; en estas circunstancias la influencia francesa fue lógicamente muy alta y existen también puentes españoles de alma llena destacables de esta época.

Salvo para luces muy cortas, la celosía acabaría desbancando casi por completo a las vigas de alma llena a lo largo de todo el siglo XIX y principios del siglo XX. El hierro y después el acero eran materiales caros, y la celosía permitía ir a cantos mayores con muy poco incremento del material necesario, reduciendo las cuantías de hierro en los puentes a la vez que simplificaba su construcción. Tenía la contrapartida, sobre todo con celosías múltiples, de tener infinidad de nudos y requerir por tanto un gran número de uniones, pero entonces primaba el ahorro en material sobre el ahorro en mano de obra.

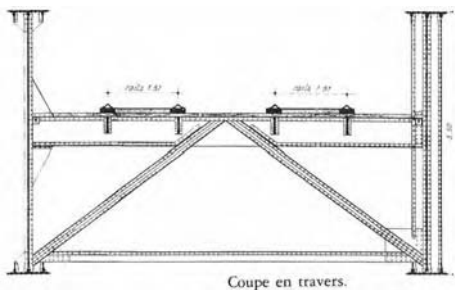


(página derecha) Viaducto de Crumlin, primera aplicación importante de la celosía tipo Warren (línea Newport-Hereford, Inglaterra, 1853).

La sección del puente de Langon (línea Bordeaux-Sète, 1855) es la típica empleada en los puentes con vigas de alma llena cuyo diseño lideró en Francia Flachat.

El pont Noir sobre el río Allier (línea Montluçon-Moulins, 1858).

Reconstrucción de puente del Tuerto, construido en 1866 pero dinamitado en la Guerra Civil (línea Palencia-A Coruña).

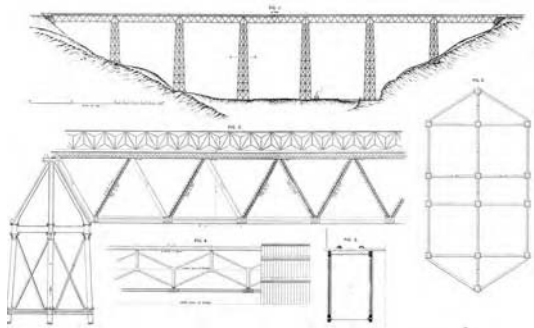


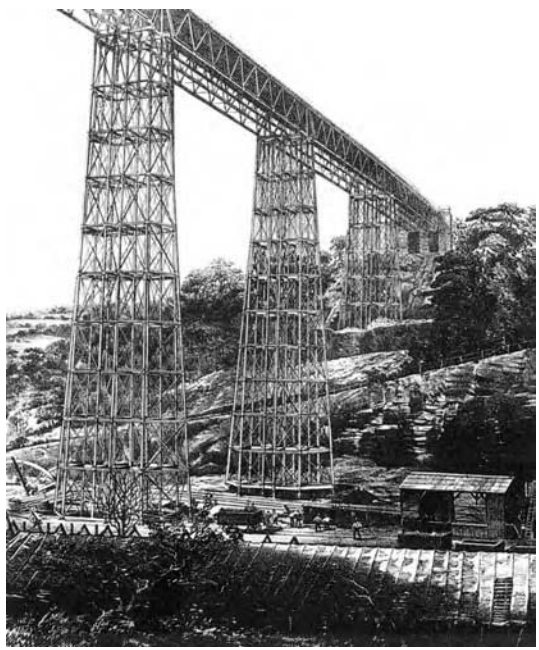
Actualmente la situación es con frecuencia la inversa, por lo que con el abaratamiento del acero y el establecimiento de la soldadura a mediados del siglo XX, se pasó a recuperar gradualmente la solución en alma llena. De hecho, si exceptuamos las grandes luces, el cajón es hoy la solución más empleada en puentes metálicos y mixtos, pues tiene importantes ventajas constructivas y de rigidez (en particular a torsión, importante cuando el puente es curvo o de doble vía). Además, el progreso en la comprensión de la abolladura en chapas comprimidas ha llevado a adecuados sistemas de rigidización que se han traducido en importantes reducciones de los espesores de chapa necesarios y consecuentemente de las cuantías de acero en los puentes de alma llena.

Si bien en Inglaterra el uso de la celosía fue más lento que en centro Europa, fue en las islas británicas donde J. Warren y W. Monzani crearon ya en 1848 la primera y definitiva patente europea: la viga Warren, aunque se cree que para ello se basaron en gran medida en la obra del ingeniero belga Neville que venía usando esta configuración. Aunque en los primeros años que siguieron a la patente no se construyó en suelo británico ninguna celosía metálica significativa, Inglaterra contaba con la más desarrollada industria metalúrgica y, al fin y al cabo, venia liderando la ingeniería de puentes a lo largo de todo el siglo, con lo que no es de extrañar que fuese en Gales donde, en 1857, se levantase el que probablemente fuese el más importante viaducto metálico en celosía hasta la fecha. Con una longitud de más de 509 metros y una altura máxima de 64 metros, el viaducto en celosía de Crumlin habría de suponer un hito y un impulso definitivo para esta tipología.

El viaducto de Crumlin permitía el paso de la línea Newport–Hereford sobre el valle de Ebbw y fue, con vanos de hasta 46 metros, la primera aplicación importante de la celosía tipo Warren. Estas celosías fueron de las primeras diseñadas en base a métodos científicos, con una clara distinción entre las diagonales a tracción, de hierro forjado, y a compresión, de hierro fundido. Las vigas, en tramos biapoyados sin continuidad, se prefabricaron a nivel del suelo. La simplicidad de la celosía y del tipo de unión en rótula mediante sencillos pasadores era tal que una cuadrilla llegó a montar una de las vigas en tan sólo dos días, para izarla después empleando sólo un día más.

Otro motivo de interés de este viaducto es el haber sido el primero en el que se emplearon apoyos móviles deslizantes articulados. Las grandes vigas habían apoyado hasta entonces en narrias sin ninguna articulación para la rotación. Fue el primer paso hacia las tradicionales rótulas mediante rodillos de los puentes metálicos del siglo XIX. Hoy las articulaciones vuelven a materializarse, como en los orígenes, apoyando sobre elementos planos, pero al ser ya de neopreno zunchado permiten al deformarse el giro en apoyos.





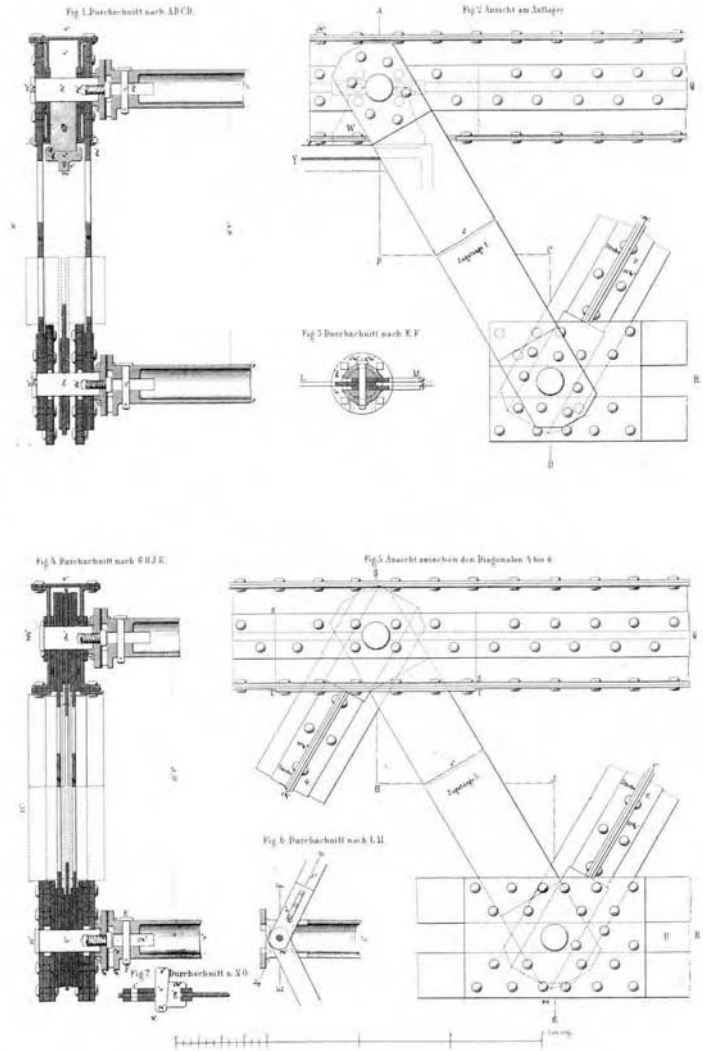


Fig 1. Durchschnitt nach ABCD.
Fig 2. Ansicht am Auflager
Fig 3. Durchschnitt nach E F
Fig 4. Durchschnitt nach G H J K.
Fig 5. Ansicht zwischen den Diagonalen Y bis 6
Fig 6. Durchschnitt nach L M.
Fig 7. Durchschnitt n. X O.

Las pilas estaban formadas por 14 tubos verticales de fundición solidarizados entre sí por barras horizontales y diagonales de hierro forjado. Con sus más de 60 metros de altura, la prensa británica rápidamente lo calificó como el puente más alto del mundo, aunque en realidad la gran palizada de Portage en Nueva York lo superaba y 5 años después también lo haría en Suiza el viaducto de Grandfey, ya mencionado. El de Crumlin, en cualquier caso, sí tuvo el honor de ser el viaducto más alto de Gran Bretaña durante todo el tiempo en que se mantuvo en servicio, hasta 1964.

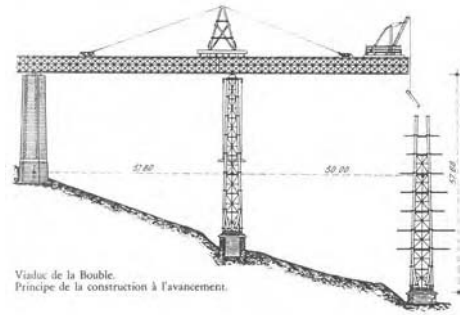
La sencillez y limpieza de la triangulación de sus almas fueron revolucionarias y no dejaron de levantar suspicacias en el momento de su construcción. El mismo año de su inauguración, el viaducto fue sometido a una intensa serie de pruebas, cargándolo con sucesivas locomotoras hasta que, con 6 y un vagón cargado, se alcanzó sobre un solo vano un peso de 380 toneladas (85 KN/m). Con un cómodo canto de más de 4 metros (poco menos de un décimo de la luz) la viga se deformó, de acuerdo con las medidas tomadas, sólo entre 2 y 3 cm, ganando la aprobación de los responsables de la línea.

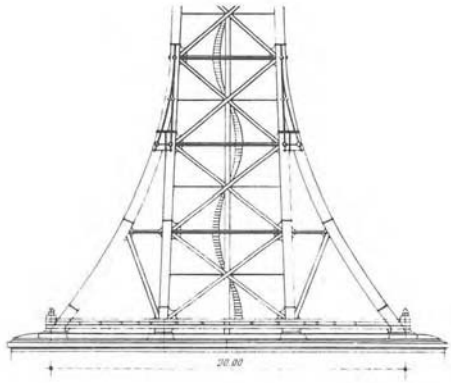
El viaducto Crumlin no fue sino la confirmación de un desarrollo espectacular de los puentes en celosía durante los años 50, que llevó a que, en los años 60 prácticamente se construyesen sólo puentes de tramo recto con triangulaciones de barras; no sería hasta los años 70 cuando las barras trianguladas se empezaron a emplear también para conformar grandes arcos. Así, ya a partir de los años 60 Europa toma el relevo de los Estados Unidos y se sitúa en la vanguardia de la construcción y desarrollo de las celosías, en un periodo en el que la expansión del ferrocarril alcanzó su cenit.

Liderando su progresión estuvieron las realizaciones francesas, que por otro lado involucraron a menudo a ingenieros germanos o suizos. Las obras de la línea Commentry-Gannat que a finales de los años 60 unió las vertientes este y oeste del macizo central son las que mejor ejemplifican este progreso. Con un relieve lógicamente muy accidentado, los escasos 52 km de esta línea requirieron 6 túneles y 7 viaductos, entre los que 4 fueron los más sobresalientes: los de Sioule y Neuvial, los primeros importantes adjudicados al taller de Eiffel, y los de La Bouble y Bellon, mayores que los anteriores y construidos por las empresas Cail y Fives-Lille bajo la dirección de W.Nördling, que venía de construir algunos de los ya mencionados grandes viaductos suizos. Estos puentes crearían escuela.

Los avances empiezan en las propias pilas, que abandonan el elevado número de tubos verticales para pasar a tener sólo 4 en las esquinas. Las pilas ganan así en claridad y esbeltez, y para no mermar la estabilidad frente a los vientos transversales se ensancha-

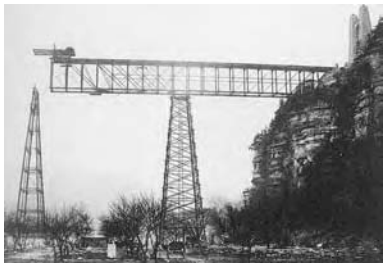
Los viaductos de la línea Commentry-Granat en el macizo central francés supusieron un gran avance en el diseño y construcción de celosías. Viaducto de la Bouble (1870).





ban en su base adaptándose de forma nítida a los basamentos de sillería en forma de tajamar sobre los que apoyaban. Este diseño puede atribuirse a Nördling, que en 1864 lo describe en una publicación de los Annales de Ponts et Chaussées que llevaba por título "Memoire sur les piles en charpentre metallique des grands viaducts". Eiffel emplearía la misma solución en sus dos viaductos vecinos en lo que probablemente fuese la simiente del diseño de su archifamosa torre parisina.

Igualmente destacable fue el progreso que se produjo en los procesos constructivos. En el viaducto de La Bouble, Nördling perfeccionó el procedimiento por empuje que ya había puesto a prueba en Friburgo para el viaducto de Grandfey, en el que las pilas no se construían previamente al empuje, sino que se montaban sucesivamente desde la punta de avance conforme ésta alcanzaba su posición. Los elementos de la pila se descolgaban desde el tablero en voladizo y atirantado provisionalmente, con lo que se reducían a la mínima expresión los elementos auxiliares necesarios en forma de cimbras o andamios, muy costosos cuando se trata de viaductos de tanta altura.



Dos fases de la construcción por voladizos sucesivos del puente de Fades (línea Saint Eloy-Pauniat, 1909). Construcción del viaducto sobre el río Kentucky en Cincinnati (1876).

(pág. dcha) Ejemplos entre las innumerables celosías europeas de la segunda mitad de siglo:

Francesas: Viaducto en la línea transalpina Nice-Coní, puente de Morteau sobre la ribera de Besançon, puente de Saumur sobre el Loira.

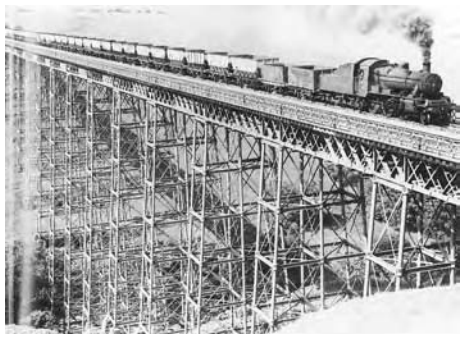
Británicas: Viaductos de Belah (1861), Toamtin (1897) y South Esk (1881).

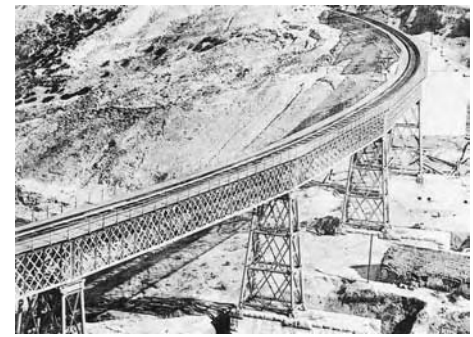
Españolas: Puente sobre el Guadalquivir, puente de Zuera (Zaragoza-Pamplona), viaductos del Chorro 1 y 2 (Córdoba-Málaga, 1867), puente sobre el Guarrizar (Madrid-Córdoba), puentes de Sariñena y de Osquia (Pamplona-Barna).

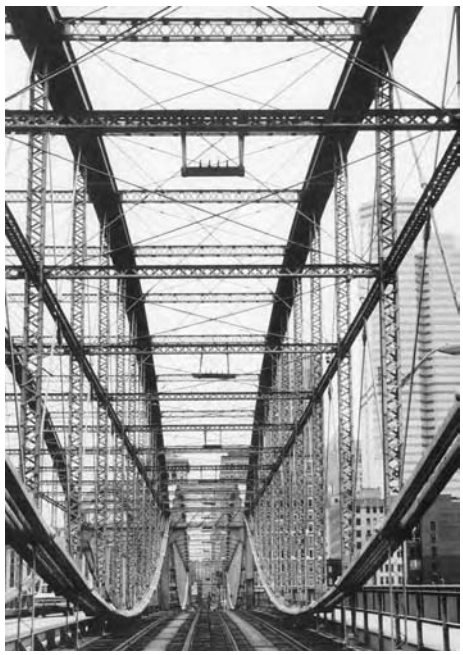
Otro problema que venían arrastrando los procedimientos de empuje eran las fuerzas que inevitablemente se introducían a las pilas, que con frecuencia basculaban apreciablemente durante el lanzamiento del tablero. Para minimizar este efecto Eiffel desarrolló un chasis de báscula que sustituyó a los tradicionales rodillos y permitió reducir las fuerzas que se transmitían a la pila ganando así en seguridad y velocidad de ejecución. El empuje del viaducto de Sioule, por ejemplo, se realizó en sólo 5 meses (hoy estos utensilios se han simplificado al pasar a usar almohadillas de teflón con neopreno que deslizan sobre chapas de acero inoxidable reduciendo al máximo el rozamiento). Está atención por los procedimientos constructivos y medios auxiliares fue característica de los proyectos de Eiffel, lo cual es totalmente lógico si se recuerda que no era sólo el diseñador, sino también el constructor de sus obras. Él y su socio Seyrig, que llevaba el peso del diseño estructural, adquirieron ya con estos primeros trabajos una gran reputación entre las compañías ferroviarias a las que, como veremos más adelante, no defraudarían.

Ya fuese tomando estos grandes viaductos como modelo, o bien recurriendo muy frecuentemente cuando los pasos eran menores a alguna de las soluciones más abiertas de las patentes norteamericanas, las realizaciones de puentes metálicos en celosía se multiplicaron a lo largo y ancho de todo el continente conforme las redes de ferrocarril se expandían.

Se acostumbraba a construir estos puentes por empuje o sobre cimbra, pero a finales del siglo XIX pasaría a emplearse frecuentemente un nuevo proceso constructivo al que hoy llamamos avance en voladizos sucesivos y que, como veremos más adelante, se había desarrollado inicialmente para la construcción de los grandes arcos metálicos. Este procedimiento consistía sencillamente en ir construyendo el tablero en voladizo desde un apoyo al siguiente o hasta que su extremo se encontraba en mitad de vano con la otra parte del tablero que avanzaba de igual modo en sentido contrario. Para ello se empleaban en ocasiones apoyos o atirantamientos provisionales, siendo muy diversas las posibilidades de avance. Este sistema se usaba en unos casos partiendo de los estribos y en otros con dos avances simétricos desde una pila. Esta segunda opción la heredaron muchos puentes de hormigón y es más habitual actualmente. Uno de los más importantes viaductos construidos con este sistema fue el de Fades ya en 1909, con una luz central de 144 metros y una altura record de 132.5 metros, de Eiffel, aunque fueron los puentes tipo Gerber, también llamados “cantilever”, los que como veremos llevaron al extremo este sistema constructivo.







Un tipo singular de celosía que tiene particular interés fue el que, con el referente del puente de Saltash de Brunel, se inició en Alemania ya en los años 50 y 60: las celosías lenticulares. Como había hecho Brunel estas estructuras combinan los mecanismos del arco, la suspensión y la viga en celosía de canto variable en soluciones de gran sentido estructural y no menos interés formal. Pese a ello, no podían competir en sencillez, velocidad y economía de construcción con las vigas en tramo recto y por ello se emplearon sólo esporádicamente. Su iniciador en Alemania fue Friederich Von Pauli, que dio nombre a la tipología, aunque algunas de las más destacables realizaciones con este sistema fueron obra de Heinrich Gerber primero y Lohse después.

Esta solución también se empleó en alguna ocasión en los Estados Unidos, siendo el puente de Smithfield (1887) en Pittsburg el ejemplo más destacado. Este puente fue construido por el ingeniero de origen alemán Gustav Lindenthal, que encabezaría un periodo de grandes obras americanas que volverían a trasladar a este continente el liderazgo en la construcción de celosías, con innumerables puentes sobre los grandes cauces americanos. Suyo fue el diseño para la línea Chesapeake-Ohio del puente de Sciotoville ya en 1917, una viga continua que con dos vanos de 236 metros supuso un nuevo record del mundo. En general, sin embargo, las grandes construcciones de este periodo no fueron celosías en viga continua sino puentes "cantilever", de los que trataremos más adelante.

Paralela al desarrollo de las construcciones en celosía es la evolución en el entendimiento teórico que de éstas tenían los ingenieros que las proyectaban. El diseño de las primeras vigas y celosías avanzó por prueba y error, basándose en las experiencias con puentes anteriores o en modelos a escala que se ensayaban para estimar la carga que soportarían y saber que miembros más débiles requerían un refuerzo.

Tras Galileo, Hooke, Marriotte y Coulomb, en los siglos XVII y XVIII, la teoría de la flexión en vigas fue finalmente resuelta de forma práctica por Navier en 1824 y perfeccionada por su discípulo Saint-Venant en su tratado de 1857. Mohr, Winkler, Menabrea, Collignon o Castigliano son otros nombres imprescindibles que no pueden dejar de recogerse al referirse a la teoría de las estructuras en el siglo XIX.

El análisis de las celosías, sometidas como las vigas a flexión, avanzó sin embargo de forma bastante independiente. Una correcta teoría sobre su diseño, que realmente permitiese diseñar las barras en proporción a la fuerza que sobre ellas actuaba, no se desarrolló hasta mediados del siglo XIX. En 1847 el neoyorquino Squire Whipple público su libro "A work on bridge building" que por primera vez proporcionaba un método racional para el diseño de celosías, describiendo la descomposición de fuerzas en los nudos que debía mantenerse en equilibrio. En Europa, las primeras grandes contribu-

Grabado y fotografía del Puente de Sciotoville, el mayor del mundo cuando se construyó en 1917.

Celosías sobre los grandes cauces americanos. Puente de High Bridge construido en 1877 sobre el río Kentucky, donde se distinguen las torres que Roebling había levantado 20 años antes para un puente colgante que se paró con la quiebra temporal de la línea.

(en pag. izquierda) Interior y perspectiva de la celosía lenticular de Lindenthal en el puente de Smithfield (Pittsburg, 1887). Celosía lenticular construida por Heinrich Gerber sobre el río Isartal.

ciones fueron las del escocés Robert Bow con su "Tratado de Arriostramiento" de 1850 y la "Mecánica Aplicada" de Rankine en 1858. Estudios como los que B.Blood y Th.Doyne publican en los años 50 en la revista "Proceedings of the Institution of Civil Engineers" sobre las fuerzas en las diagonales también fueron aportaciones relevantes.

Muchos de estos avances teóricos vienen a coincidir con un creciente uso del hierro, que los impulsó a raíz de dos de sus características diferenciadas. Si la piedra era pesada y cara, y la madera ligera y barata, el hierro era en cambio ligero y caro. Los puentes de hierro eran en comparación con que los de piedra menos tolerantes con unas sobrecargas que el tren había disparado, pues por la ligereza del material éstas pasaron a suponer una parte mucho más significativa de la carga total que el puente debía soportar. Los esfuerzos que debían resistir los diferentes elementos pasaron a ser muy dependientes de la carga de tráfico y su desconocimiento se tradujo no infrecuentemente en fallos locales o incluso colapsos de estructuras.

Por otro lado el precio del hierro no favorecía precisamente la solución que se daba a esta problemática con la madera, que consistía simplemente en un empleo generalizado de elementos sobredimensionados pero de poco coste. Así pues, existía una fuerte demanda de métodos que permitiesen establecer científicamente los esfuerzos a los que los distintos elementos de una celosía estaban sometidos para poder en consecuencia situar eficientemente el material y optimizarlo de forma segura.

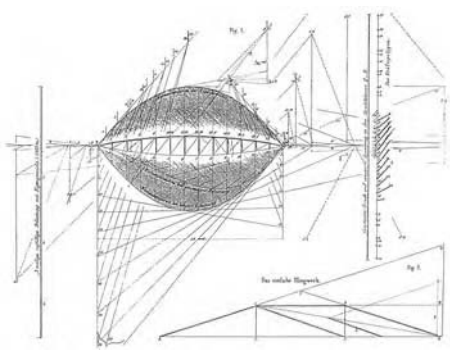
La solución definitiva a esta demanda la proporcionaría el ingeniero alemán Carl Culmann que con su viaje de investigación a los Estados Unidos fue uno de los principales artífices de la llegada a Europa de las soluciones en celosía a principios de los años 50. En 1855 pasó a dirigir la escuela de ingeniería del politécnico de Zurich, y en 1866 público "Die Graphische Statik" (Estática Gráfica), obra que serviría de referencia a los ingenieros durante décadas. En ella Culmann desarrollaba métodos gráficos para el cálculo de esfuerzos en vigas y barras plasmando una máxima que solía repetir y hoy no por a veces olvidada es menos cierta: "El dibujo es el lenguaje de los ingenieros". El sucesor de Culmann en Zurich, Wilhelm Ritter, perfeccionó sus métodos, que acabaría de estandarizar el italiano Cremona, del politécnico del Milán, cuyos famosos diagramas se generalizaron como procedimiento gráfico para el cálculo de estructuras y sólo se abandonarían ya con la llegada de las primeras computadoras.

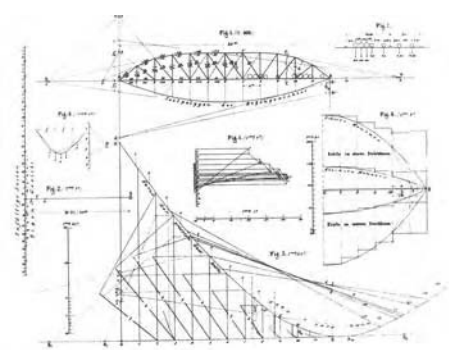
El ordenador ha supuesto una revolución en el cálculo de estructuras ofreciendo unas posibilidades que no hubiesen cabido ni en los más visionarios sueños de los ingenieros del ferrocarril del siglo XIX. Actualmente se trata sin duda de una herramienta fundamental para el diseño y optimización de puentes y estructuras de creciente envergadura y complejidad. Sin embargo, al rememorar las grandes obras de la ingeniería que se diseñaron con lápiz y papel, y de las cuales muchas se mantienen hoy en servicio (haciendo gala de una acertada concepción y unos cuidados detalles), cabe preguntarse si tanto como el ordenador ha proporcionado con creces lo que entonces faltaba, no habrá también contribuido con sus atajos a que en ocasiones falte a los ingenieros que siempre lo hemos tenido al lado lo que los de entonces no podían permitirse dejar de atesorar.

La capacidad para efectuar cálculos aproximados pero sencillos que proporcionen las cifras fundamentales para el control de una estructura, el manejo -para valorarlas- de los groseros pero fundamentales rangos y ordenes de magnitud, la habilidad para reconocer sin perderse en marañas de cálculo los puntos y cifras clave que concentran el interés de la estructura, la atención y cuidado por el detalle para cuya concepción ayuda sin duda más un papel que una pantalla, son sólo algunas entre las muchas cualidades que, independientemente de las herramientas que manejen, destacan por igual en los grandes ingenieros de ayer y de hoy.

No pretenden estas reflexiones restar importancia a un hoy casi imprescindible uso de los medios informáticos en el diseño, sino tan sólo alertar ante la tentación a veces inadvertida, y no pocas veces experimentada por quien esto escribe, de pretender con ellos suplir labores fundamentales del ingeniero de puentes que no pasan por un teclado.

Ejemplos de cálculos de celosías empleando la estática gráfica desarrollada por Culmann.





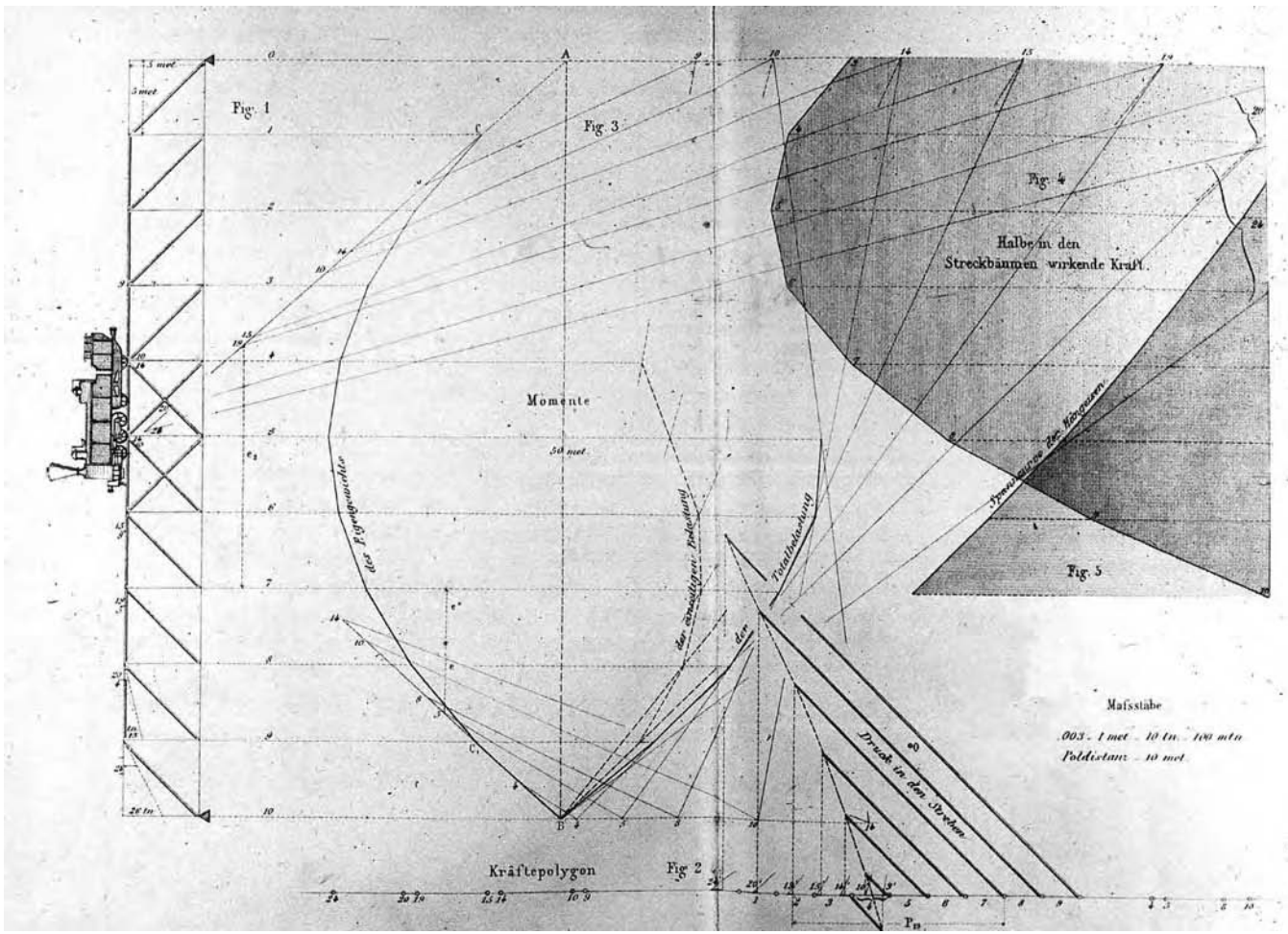
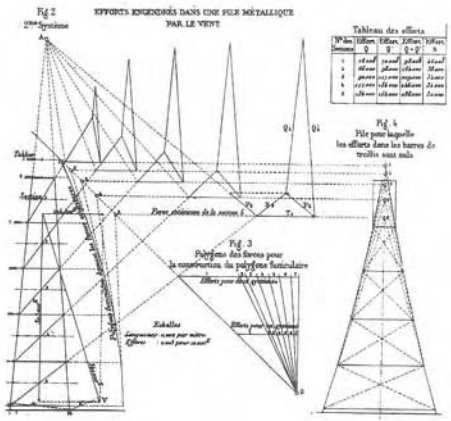


Fig. 1
Fig. 3
Fig. 4
Fig. 5
Fig 2
Momente
Kräftepolygon
Halbe in den Streckbäumen wirkende Kraft.
Druck in den Streben
Maßstäbe
Poldistanz = 10 met.



Cálculo gráfico por Maurice Koechlin del efecto del viento sobre las pilas de uno de los altos viaductos construidos por la empresa Eiffel.

Grabado de la infructuosa búsqueda de supervivientes tras el desastre del puente del Tay (1879).

Volviendo a los avances teóricos de la época conviene no olvidar los que, aunque no puramente estructurales, se debieron al mismo Eiffel, que estudió en profundidad los efectos del viento sobre las construcciones , lo que resulta lógico teniendo en cuenta la altura y dimensión de sus mayores viaductos y, por supuesto, de su torre. Aún así, fue el viento el causante del único revés de importancia que sufrió Eiffel a lo largo de su prolífica trayectoria, cuando durante la construcción del viaducto de Tardes un viento huracanado durante el delicado proceso de construcción derribó el tablero. Ello no causó desgracias personales ni impidió que en 1884 el viaducto se concluyese como estaba proyectado para convertirse con sus 91.5 metros de altura en el viaducto más elevado hasta el momento, pero sin duda acrecentó más si cabe el interés por el estudio del viento y la aerodinámica de Eiffel. De hecho la limpieza de sus celosías y el empleo de perfiles tubulares responden no sólo a razones resistentes sino también a una búsqueda de minimizar la superficie expuesta y el empuje que pudiese producir el viento.

Por desgracia no todos los ingenieros supieron tener la precaución con respecto al viento que mostró Eiffel, pese a que los grandes puentes coinciden con frecuencia con los grandes vientos, al tender los segundos a crecer en los encañonados valles y abiertos estuarios que reclaman a los primeros. Tristemente, el admirable progreso tecnológico del siglo XIX también se cobró su precio.

En la conexión ferroviaria entre Escocia e Inglaterra competían dos compañías rivales: la North British en el este y la Caledonian en el oeste. La primera tenía ventaja en Inglaterra pero sin embargo veía su traza interrumpida en el norte por dos grandes estuarios, el Firth of Tay y el Firth of Forth, que obligaban a los pasajeros a realizar parte del trayecto en incómodos y lentos ferrys cuyas salidas estaban sujetas al estado de la mar y sufrían frecuentes cancelaciones. En los años 60 del siglo XIX quedó claro que si la North British no quería quedar definitivamente desbancada, el tren debería viajar sobre las aguas como desde tiempo atrás argumentaba el ingeniero jefe de la línea, Thomas Bouch. Los puentes que la compañía se decidiría a levantar sobre ambos estuarios darían lugar a uno de los mayores logros de la ingeniería británica, en el Firth of Forth, pero también al que sin duda es el más trágico colapso estructural de su historia, el desastre del puente sobre el Firth of Tay.

Dicho puente, construido en la primera mitad de la década de los 70, tenía una longitud de 3.264 metros y era con mucho el más largo puente metálico del mundo. Consistía en 85 vanos en celosía, de los que 13, denominados “High Girders”, debían facilitar la navegación, por lo que tenían una luz superior de 75 m y se situaban independientes del resto de la estructura por encima de la rasante, de forma que la vía única viajaba por su interior. Las pilas eran de hierro fundido y se anclaban en soportes de

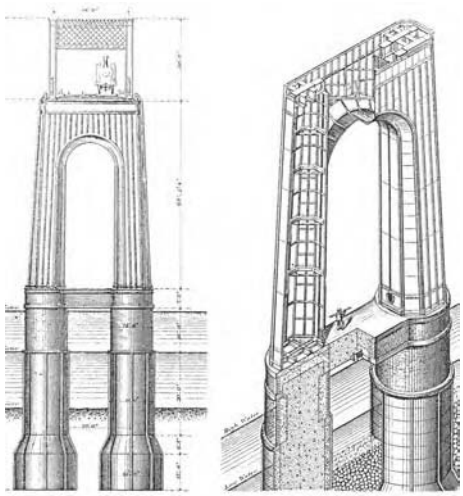
fábrica que se hundían en las afortunadamente poco profundas aguas del estuario. El proyecto fue la culminación de la brillante carrera de su autor, llamado desde entonces Sir Thomas Bouch, pues la ola de admiración que produjo la construcción del puente le valió su nombramiento como "caballero" por la reina Victoria.

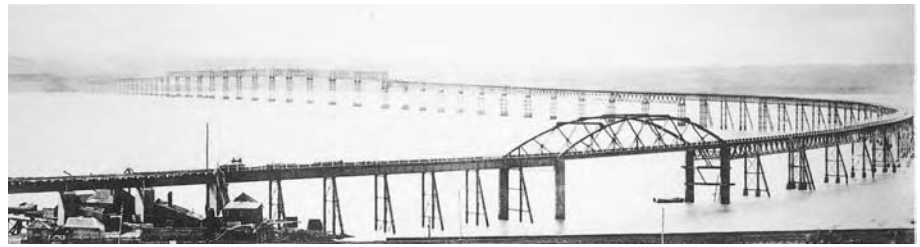
Apenas dos años después de que el primer tren hubiese cruzado triunfante el estuario escocés, en la fatídica y ventosa noche del 28 de diciembre de 1879, las luces del tren de la tarde de Edimburgo a Dundee se vieron apagarse sobre el puente. Al rato y sin sospechar lo ocurrido, el personal de la estación de Dundee se acercó al puente para encontrar que las 13 "high girders" y las pilas que las soportaban habían caído al río bajo el empuje de una fuerte galerna, arrastrando al tren y sus 75 pasajeros con ellas. No hubo supervivientes.

El colapso del puente sobre el Tay y la grave pérdida humana que supuso cayeron como una losa sobre la otrora hegemónica ingeniería británica. El informe de la comisión de investigación no atribuyó culpabilidades directas pero fue tajante al expresar que el aclamado puente había sido "mal diseñado, mal construido y mal mantenido". Aunque fueron muchos los defectos detectados, que conforman el cúmulo de circunstancias que rodean las causas de todo accidente, se prestó en el informe especial atención a las cargas de viento consideradas en el diseño, que basándose en tablas centenarias habían sido de apenas 50 kg/m^2, lo que contrastaba con los conservadores valores de más de 200 kg/m^2 que ya se venían empleando en Francia o Estados Unidos.

Esquemas de las robustas pilas del nuevo viaducto del Tay.

Antiguo y nuevo viaductos del Tay (1871/1887).





No existe por otro lado acuerdo total acerca del lugar o lugares donde se originó el fallo estructural, aunque suele considerarse que éste pudiera haberse iniciado en la propia base de las pilas metálicas. En efecto, su conexión mediante pernos de 200 toneladas de capacidad a unos pocos bloques de fábrica, con una capacidad de anclaje un orden inferior, pudo muy bien haber sido el más débil eslabón de una mal concebida cadena de transmisión de cargas, a la que el empleo de materiales después comprobados defectuosos desde luego no ayudó, y que cedió cuando a la superficie expuesta al viento de la propia estructura se le sumó la del tren que la atravesaba. El puente fue reemplazado por completo por otro paralelo ya de doble vía con idéntica distribución de vanos y una, comprensiblemente, exagerada robustez. Aunque éste se concluyó pocos años después, Bouch no llegó a ver al sustituto de su puente. El impacto del fracaso fue para él tristemente tan rotundo como el del éxito, y el antes considerado ingeniero modelo sufriría un auténtico calvario profesional para morir abrumado sólo 10 meses después de una catástrofe que ocultaría para siempre la que había sido una larga y distinguida carrera que pese a todo probablemente mereciese un mejor memorial que el de las bases de las pilas de su fracasado puente, todavía visibles junto al nuevo, bañadas por las mareas del estuario escocés.

El ferrocarril del Santa Fe's Columbia Gorge sin apoyo por el efecto demoledor de una riada.

Colapso del puente de Mönchenstein, 75 muertos (Alemania, 1891).

Uno de los vanos del Million Dollar Bridge perdió el apoyo en la pila durante un terremoto (Alaska, 1911).

Poco antes del accidente del Tay se había producido otro colapso en Estados Unidos que también fue el más trágico de su historia. El puente de Ashtabula que soportaba el paso del tren sobre una garganta cercana al lago Erie y que al construirse en 1865 había sido una de las primeras vigas Howe enteramente de hierro, colapsó en 1876 llevándose la vida de 92 de los pasajeros. Se citaron como motivos del accidente una excesiva carga muerta o una triangulación secundaria insuficiente, pero probablemente las causas tenían un fondo que era similar al de los otros 25 fallos de puentes que, aunque no tan trágicos, se producían como promedio cada año en los Estados Unidos en los años 80 del siglo XIX.

Por un lado muchos diseños se habían venido haciendo sin una suficiente base científica, lo que como hemos visto empezaba a corregirse con importantes avances en el análisis de estructuras y con la aparición de ingenieros que son recordados específicamente como expertos diseñadores de puentes, a diferencia de los grandes pero al fin y al cabo humanos ingenieros de las primeras líneas que con frecuencia participaban en prácticamente todo lo que involucraba el ferrocarril. A finales del siglo XIX proliferaban ya publicaciones con prácticas tabulaciones, secciones estructurales estandarizadas, resultados de ensayos, e incluso normas y especificaciones para el diseño y la construcción.

Por otro lado, el hierro había revolucionado por su mayor resistencia las posibilidades en la construcción de puentes, pero no pocos se habían fabricado con escasos conoci-

mientos de metalurgia, lo que se tradujo con frecuencia en desiguales métodos de fabricación y fundiciones o forjas defectuosas. El hierro como material presentaba además un comportamiento frágil (que no débil) y era, por lo tanto, brusco en su rotura, que ninguna señal anticipaba y poco tolerante con defectos de diseño o sobreesfuerzos no previstos.

La ductilidad, característica opuesta a la fragilidad, es la capacidad de un material de alcanzar grandes deformaciones antes de la rotura, lo que lleva a que, antes de que una estructura ceda, se produzcan importantes desplazamientos que permiten absorber energía y suponen un valioso aviso previo a un colapso. Pero más importante es el que, unida al hiperestatatismo o redundacia (traducción literal de la denominación anglosajona más autoexplicativa), la ductilidad dota a la estructura de cierta capacidad para repartir sus esfuerzos de forma que, en el preagónico estado límite último previo a un colapso, elementos más liberados de una estructura bien diseñada puedan llegar en "ayuda" de los que se encuentran próximos a la rotura.

El material que habría de proporcionar esta fundamental cualidad, paliando en buena medida la problemática latente antes descrita, se venía desarrollando desde que, en 1856, Bessemer ideara con su convertidor un proceso asequible para controlar el contenido de carbono en el hierro que poco después Martin y Siemens perfeccionaron. El acero, más resistente y sobre todo más dúctil que el hierro, tuvo una aparición lenta, pero cuando en los años 70 del siglo XIX su precio bajo un 75%, pasó a protagonizar una nueva fase en la construcción de puentes.

Curiosamente, la primera aplicación de este nuevo material no llegaría en forma de viga en celosía, tipología con la que por entonces se construían la inmensa mayoría de los pasos. A mediados de los años 70, para que ante la pujante Chicago la ciudad de St. Louis pudiese mantener su posición destacada en el comercio Este-Oeste en los Estados Unidos, era capital que el ferrocarril cruzase por primera vez el Missisippi, y para ello el capitán James Eads iba a recurrir al arco.

Colapso del puente de Douarnenez por inestabilidad del cordón comprimido durante el lanzamiento.

Viaducto de Saint-Mammes, sobre el río Loing en la línea Paris-Dijon, y viaductos británicos de Victoria (Arley-Worcester, 1862), Waterside (Ingleton-Tebay,1861) y Loch Ken (Castle Douglas-Stranraer, 1861).

2.3 Arcos

Más allá, por supuesto, de los arcos de piedra, también arcos de hierro se vinieron construyendo esporádica pero ininterrumpidamente desde las primeras líneas de ferrocarril. Los franceses, después de los primeros arcos de Nevers y Tarascon ya comentados, construyeron varios similares como el de Lyon, La Voulte o Saint Mammes. Por lo general mantenían la idea introducida por Telford de los tímpanos rígidos, incorporando en éstos un tejido de barras triangulado que resultaba muy eficaz en el reparto de cargas y en la imprescindible reducción de las flexiones en el arco debidas a sobrecargas no simétricas.

En Inglaterra se construyeron también notables arcos de fundición con tablero superior como el de Waterside que en 1861 permitió alcanzar una luz mayor en uno de los vanos de un por lo demás tradicional viaducto de piedra, marcando así claramente la posición del obstáculo que provoca el cruce elevado. Otro ejemplo interesante es el del Victoria Bridge, construido sólo un año más tarde, y en el que ya se apuntaba hacia la sustitución de la triangulación de los tímpanos por simples elementos verticales que transmiten la carga del tablero al arco. Esta configuración, fundamentalmente por su mayor sencillez constructiva y gran nitidez visual, es la que con un aumento progresivo de la distancia entre elementos verticales ha llegado a nuestros días.

Renunciar a la triangulación en los tímpanos, sin embargo, requiere que la pérdida de rigidez que se deriva de ello se compense en cambio con una mayor capacidad del propio arco, que pasará a soportar mayores esfuerzos de flexión. Esto queda patente en este ejemplo con las potentes dovelas de hierro fundido que conforman el arco. Fue en el momento de su construcción y con una luz de 61 m el mayor arco de fundición de las islas británicas. Sería de las últimas aplicaciones de este material, que prácticamente se había abandonado para los elementos en flexión y tracción desde el desastre ya mencionado del puente de Dee en 1846. Su uso esporádico en elementos fundamentalmente sometidos a compresión como pilas y arcos no acabaría definitivamente hasta principios de los años 90 del siglo XIX, momento en que la Cámara de Comercio proscribió por completo el empleo del hierro fundido en puentes de ferrocarril tras el colapso del puente londinense de Norwood.

Con frecuencia en Gran Bretaña se prefirió sobre este tipo de solución con el tablero superior la de arco atirantado o bowstring. Los irrepetibles Stephenson y Brunel, cuyas mayores obras de este tipo fueron los ya descritos puentes de High Level y Windsor respectivamente, habían sido los iniciadores. Así, se construyeron en las islas británicas puentes como los viaductos de Loch Ken, de 1861, o los ya mayores de Monkwearmouth y Severn, ambos de 1879.

Las ventajas de una configuración bowstring eran varias, pues a la vez que mantenía la eficacia estructural del arco podía permitir salvar algunas de las desventajas que tradicionalmente se le asociaban. Con el arco atirantado la flecha del arco no obligaba a elevar la rasante ni restaba gálibo sobre el obstáculo que se salvaba. Evitaba también las fuertes reacciones horizontales en apoyos, lo que lo independizaba de la calidad del terreno y posibilitaba la fabricación de los vanos fuera de su posición para su posterior montaje, tal y como con frecuencia se hacía con las vigas, lo que podía ser una ventaja crucial en particular en los pasos sobre los grandes cauces. Por otro lado, en contraposición con el arco con tablero superior, la solución bowstring requería, lógicamente, un material y sistemas de unión que ofreciesen plena confianza trabajando a tracción ya fuese en las péndolas de cuelgue del tablero o en el tirante inferior, de ahí que no se desarrollase hasta la consolidación del hierro forjado primero y del acero después.

Puentes de ferrocarril de esta tipología se han construido con frecuencia por todo el mundo, y entre ellos en España y de esta época destaca el de Chapina, construido en 1880 en la línea Sevilla-Huelva, que al inclinar además los elementos de cuelgue logra que el mecanismo del arco se combine con la capacidad a flexión de una celosía, lo que evita flexiones sobre el primero. Sin embargo no todo fueron tiempos de gloria para el arco. A finales de los años 50 y en particular en los años 60, su empleo pasó a ser muy esporádico, pues en su rango de luces se vio desplazado por los tan eficientes puentes viga en celosía. Pero, como suele decirse que la unión hace la fuerza, precisamente habría de ser el cruce de ambas tipologías, arco y celosía, el que relanzaría las posibilidades de los puentes arco devolviéndoles un papel protagonista en la construcción de los mayores puentes. Una significativa parte de las grandes obras del ferrocarril de finales del siglo XIX y principios del siglo XX tendrían como soporte al arco en celosía.

Arcos bowstring de Mokwearmouth, sobre el río Wear (1879), de Severn, sobre el río del mismo nombre (1879) y de Chapina sobre el río Guadalquivir (línea Sevilla-Huelva, 1880).

Capitán James Eads (1820-1887).
Puente de Eads o de St. Louis (1874).

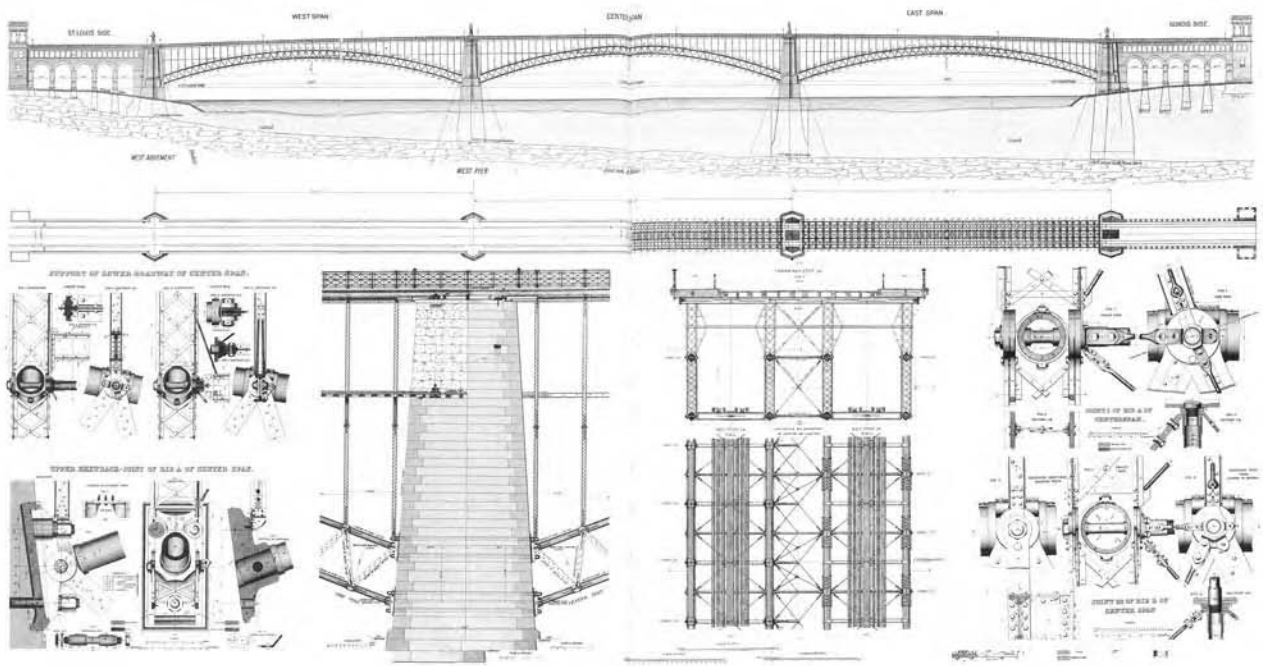
(página derecha) Planos generales y de detalle del puente de Eads. Imagen de la construcción por avance en voladizo con atirantamientos provisionales.

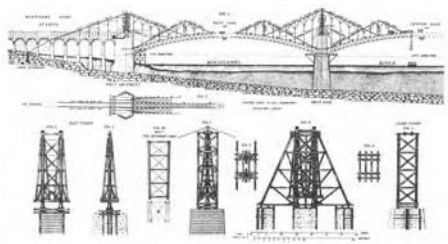
La primera gran realización llegaría de la mano del ya mencionado Capitán James Eads y su puente de Saint Louis, que en 1874 cruzaba con su triple arco sobre el Mississippi en el medio oeste americano. También se conoce simplemente como puente de Eads, extraordinario personaje que no era ingeniero y que sin embargo hizo escuela con el que de hecho fue el único puente que construyó. Su formación provenía de su amplia experiencia como diseñador de diferentes barcos y de la gran diversidad de los trabajos que emprendió a lo largo de toda una prestigiosa carrera en torno al Mississippi, lo que le convirtió en un profundo y reconocido conocedor del río en lo que fue su principal tarjeta de presentación como diseñador del puente.

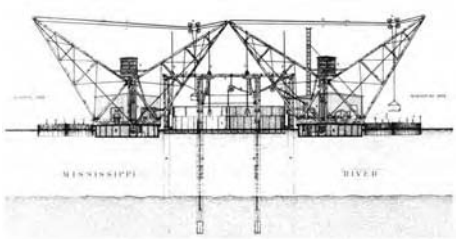
Otros proyectos de puentes se venían proponiendo desde años atrás por ingenieros reputados, pero en general contaban con cimentaciones mediante pilotes hincados y se estimaron no viables por no considerar con rigor suficiente las grandes dificultades que se derivaban de cruzar un río de tan tremendo caudal y rápido flujo. A su paso por Saint Louis el Mississippi tenía un cauce de 460 metros, gran variabilidad del nivel del agua, un traicionero lecho dramáticamente cambiante y blandos sedimentos sobre el cauce en capas de decenas de metros; arrastraba pesados troncos en verano y grandes bloques de hielo en invierno, si es que no quedaba completamente congelado. Sencillamente, a mediados del siglo XIX el sueño de un puente sobre el Mississippi no se consideraba todavía técnicamente viable.

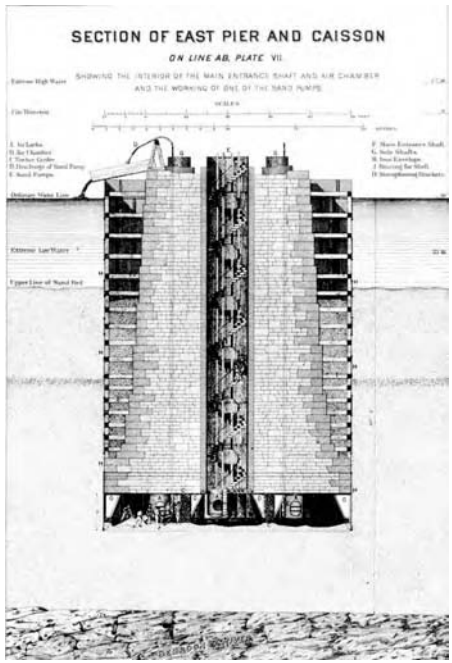
Sin embargo el ferrocarril avanzaba como de costumbre unos pasos por delante de la técnica a la que forzaba a superarse, y ya a partir de 1850 se consideraba indispensable que las vías cruzasen sobre el río si Saint Louis quería mantener una posición destacada en el comercio este-oeste. La propuesta de Eads llegaría en forma de 3 arcos de 150 metros apoyados sobre cimientos que habrían de atravesar la capa de barro y arena hasta alcanzar el lecho rocoso. Soportarían un tablero inferior para las dos líneas de tren y otro superior para personas, carros y diligencias. Se trataba de los mayores arcos nunca construidos, siendo la primera vez que esta milenaria tipología superó los 100 metros, casi un siglo después del primer arco metálico en Coalbrookdale.

Eads apenas contó con precedentes a lo largo de los más de 6 años que duró una construcción que según progresó mostró rápidamente que habría de costar el doble de lo planeado. Pero no todos los problemas fueron técnicos o financieros, pues muchos provinieron o se acrecentaron por las críticas de agoreros ingenieros, a menudo estimuladas por intereses de compañías rivales o que participaban del amenazado negocio de los ferries. El propio Henry Linville, uno de los constructores de puentes más prestigiosos, cuyas principales obras en forma de vigas en celosía hemos ya mencionado, llegó a afirmar que los arcos sin precedentes de Eads colapsarían antes de que ninguna locomotora llegase a cruzarlos.


WEST SPAN
CENTRE SPAN
EAST SPAN
ST LOUIS SIDE
ILLINOIS SIDE
WEST ABUTMENT
WEST PIER







James Eads se mantuvo sin embargo firme ante los numerosos ataques y existen citas de sus escritos en defensa de su solución que muy bien pudieran plantearse como máximas de la innovadora era del ferrocarril: "¿Debe admitirse que porque algo nunca se ha hecho no puede hacerse realidad, cuando nuestro conocimiento y razonado juicio nos permiten asegurar que es posible?". Eads no sucumbió ante los enormes problemas que afrontó y mientras ningún puente de Linville, como tantos otros de la época, se mantiene hoy en servicio, el de Eads ha seguido soportando el peso de las cada vez mayores locomotoras como el más señalado y hermoso de los hoy ya numerosos pasos sobre el Mississippi.

Todo ello fue no pocas veces a costa de la salud de Eads que se echó a la espalda la completa responsabilidad de tan abrumadora empresa. Precisamente sería de un viaje de recuperación en Francia de donde obtendría, al observar las técnicas del viejo continente, la idea para perfeccionar el cajón neumático con aire comprimido que habría de permitir atravesar bajo el agua una capa de 25 metros de barro y sedimentos hasta el apoyo en la roca. Fue una de las primeras aplicaciones de este método en Estados Unidos, aunque por desgracia Eads no se llevó con él la lección ya aprendida en Europa acerca del peligro de las descompresiones rápidas, y varios trabajadores murieron a consecuencia de éstas hasta que este fenómeno pasó también a controlarse al otro lado del Atlántico.

Pero las técnicas que se desarrollaron por primera vez en el puente de Eads no acabarían ni mucho menos en las decisivas cimentaciones. Se trataba como hemos dicho de unas de las primeras aplicaciones de los arcos en celosía, para los que, además, se empleó el acero por primera vez en un puente, pues sólo recientemente había empezado a producirse de forma asequible (la calidad de los primeros aceros era sin embargo desigual, situación que las exigentes condiciones de suministro y control que exigió Eads ayudarían a corregir sentando un inestimable precedente). Pero los arcos del puente de Saint Louis, de los que el central salvaba una luz de 158.5 metros, no sólo empleaban un material novedoso para salvar la mayor luz conocida en un arco particularmente rebajado, sino que se daba además la circunstancia de que hasta entonces todos los arcos se habían construido sobre cimbra, lo que no parecía lo más recomendable teniendo debajo el Mississippi. Realmente no es de extrañar que el innovador ingenio de Eads levantase suspicacias entre los técnicos más conservadores.

Para evitar la necesidad de una cimbra, en su propuesta Eads desarrollaba por primera vez el método de construcción que ha llegado hasta hoy como el principal y casi único para construir los puentes de mayor luz: el avance por voladizos sucesivos (excepción hecha de los puentes colgantes). En Saint Louis, además, se ensayó este

proceso en sus dos vertientes, tanto avanzando desde un estribo como haciéndolo con dos semiarcos simétricos desde una de las pilas centrales. Para ello se ideó un sistema de torres de madera desde la que se atirantaba provisionalmente los crecientes semiarcos. El atirantamiento se hizo en dos fases, con un segundo tirante cuya torre se situaba sobre el extremo del primero en una configuración que mostraba una pasmosa claridad de ideas. El arco era articulado en arranques para permitir ajustes durante la construcción y el cierre final del arco en la clave, y de hecho la gran mayoría de los puentes arco metálicos que se construirían en el siguiente medio siglo fueron biarticulados, y emplearon técnicas de construcción análogas a la que empleó Eads.

(página izquierda) Puente de Eads. Plano del procedimiento de avance por voladizo y los elementos auxiliares. Esquema de la maquinaria empleada para el posicionamiento y hundimiento del cajón, y la posterior colocación de la fábrica. Sección de la pila Este que muestra la entrada principal y la cámara de aire inferior, así como una de las bombas de arena en funcionamiento.

El puente de María Pía sobre el Duero (Oporto, 1877).
Arco de Stoney Creek (Canadian Pacific Railway, 1893).

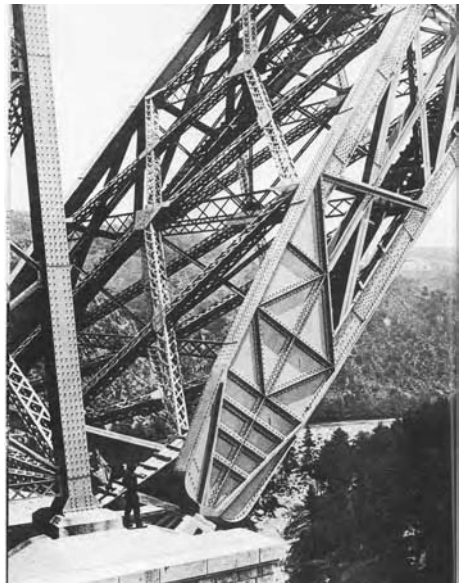
Pese al éxito que supuso el puente de Eads, el empleo del arco fue muy esporádico en Estados Unidos, en particular para el ferrocarril en el que los puentes en celosía estaban tan firmemente arraigados que pocas líneas se plantearon recurrir a otra tipología, aunque existen excepciones como la del Canadian Pacific Railway que contaba con varios arcos tímpano entre los que destaca el de Stoney Creek, de 1893. El relevo de Eads se tomaría en Europa, donde mientras se construía el gran puente sobre el Mississipi se estaban gestando para el ferrocarril algunas de las grandes obras con arcos metálicos del siglo XIX. Posiblemente el mayor referente sea el viaducto de Garabit completado en 1884 en el macizo central Francés y obra cumbre de Eiffel en la construcción de puentes. Aunque los conceptos y técnicas que hicieron posible esta obra tuvieron un antecedente directo de casi igual envergadura nacido del concurso de 1875 para el proyecto y construcción del gran viaducto de María Pía que habría de permitir la conexión ferroviaria de Oporto salvando el río Duero.

La propuesta de la empresa de Eiffel con un gran arco en celosía con tablero superior sobre distanciadas pilas verticales resultó ganadora, no tanto por lo acertado de su diseño y sus avanzadas técnicas de construcción, que será lo que más nos interese, sino sencillamente porque fue con mucho el más económico de los proyectos que concursaron. Ambas cualidades están, que duda cabe, íntimamente relacionadas.

El arco de María Pía estaba articulado en arranques, entre los que salvaba una luz record de 160 metros. Se trata de una celosía con una original e ingeniosa geometría que se adaptaba perfectamente a las solicitaciones a las que iba a estar sometido. En alzado, el canto del arco biarticulado crecía rápidamente desde los arranques con momento nulo, para hacerse máximo en los riñones y coronación del arco, donde habrían de producirse las mayores flexiones como consecuencia de las cargas concentradas o no simétricas. En planta, en cambio, el punto de menor anchura del arco estaba en coronación (facilitando el apoyo del estrecho tablero de vía única) para ir creciendo marcadamente conforme descendía hacia los arranques, proporcionando así la necesaria resistencia y rigidez frente a los vientos transversales. Configuración llena de

(pág. derecha)
Viaducto de Garabit en el macizo central francés (línea Marvejols-Neussargues, 1884). Fotografías y esquemas del proceso constructivo por avance en voladizo. Plano de detalle de los atirantamientos provisionales y su anclaje en la estructura.

El hombre en la imagen proporciona la escala del detalle de la articulación en los arranques del arco de Garabit (1884).

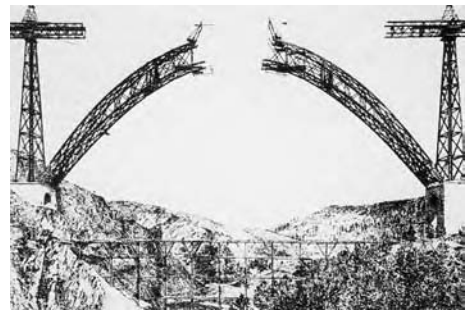


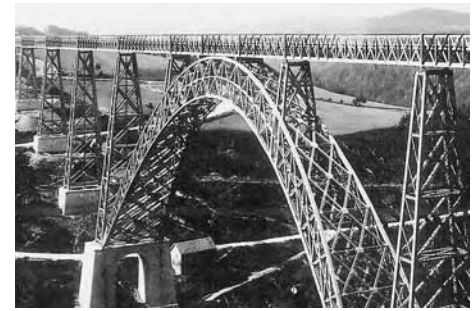
sentido que, al tiempo que singulariza cada perspectiva del puente, alecciona ante la tentación de considerar al arco como un elemento bidimensional.

Eiffel reproduciría la elegancia de esta solución cuando, avalado por el éxito del viaducto de Maria Pia, se le propuso construir el que habría de ser el mayor viaducto del mundo para unir con el tren Marvejols y Neussargues, de nuevo en el macizo central francés, cuyos recursos mineros eran cada vez más demandados por la creciente industria gala. Prueba del prestigio del que Eiffel se había ido haciendo merecedor es el que una obra de tal magnitud se le asignase a él, como el más capaz de los ingenieros y constructores, sin ningún tipo de concurso previo.

De nuevo enfrentado al paso del ferrocarril por los anchos y ventosos valles del macizo central, Eiffel planteó otro viaducto con una viga continua en celosía, uno como tantos otros si no fuese porque 2 de sus pilas intermedias no apoyaban sobre el terreno sino sobre el mayor arco que nunca se hubiese construido. Con una luz de 165 metros Eiffel se autoarrebató el record establecido poco antes en Oporto. Impuesto por la profundidad del valle del río Truyere el arco de Eiffel que sostiene el tablero 122 metros por encima de su cauce permitió no sólo ahorrar varias horas de trayecto con respecto al trazado anteriormente previsto sino también ahorrar aproximadamente 2 millones de francos al presupuesto. Si en principio los responsables de la línea no lo habían planteado fue sencillamente porque no se consideró técnicamente posible. Al menos no hasta que se involucró a Eiffel y su equipo.

El viaducto tiene 564 metros de longitud total, de los que 448 corresponden al tablero metálico. Las pilas más altas tienen 82 metros. El arco tiene una flecha de 51 metros lo que viene a ser casi un tercio de la luz y su ancho transversal alcanza los 20 m en su base, lo que refleja la constante preocupación de Eiffel por la fuerza que sobre sus altas estructuras habría de ejercer el viento, encauzado con energía por los valles de la cordillera francesa. El valle del Truyere era más ancho y profundo que el del Duero, y por ello la mayor diferencia entre el arco de Garabit y el de Oporto está en la flecha del arco, mayor en el viaducto francés pese a que en éste el tablero pasó exento sobre el arco, sin entrelazarse con él, lo que mejora su continuidad visual. Las luces del tablero eran de 55.8 metros, lo que se mantuvo en los dos vanos sobre sendos laterales del arco llevando las pilas de apoyo sobre éste a una posición más cercana a la clave que en el viaducto de Maria Pía. Esto resulta favorable para el arco, cuyo punto pésimo de carga puede situarse en general en torno al cuarto de la luz.





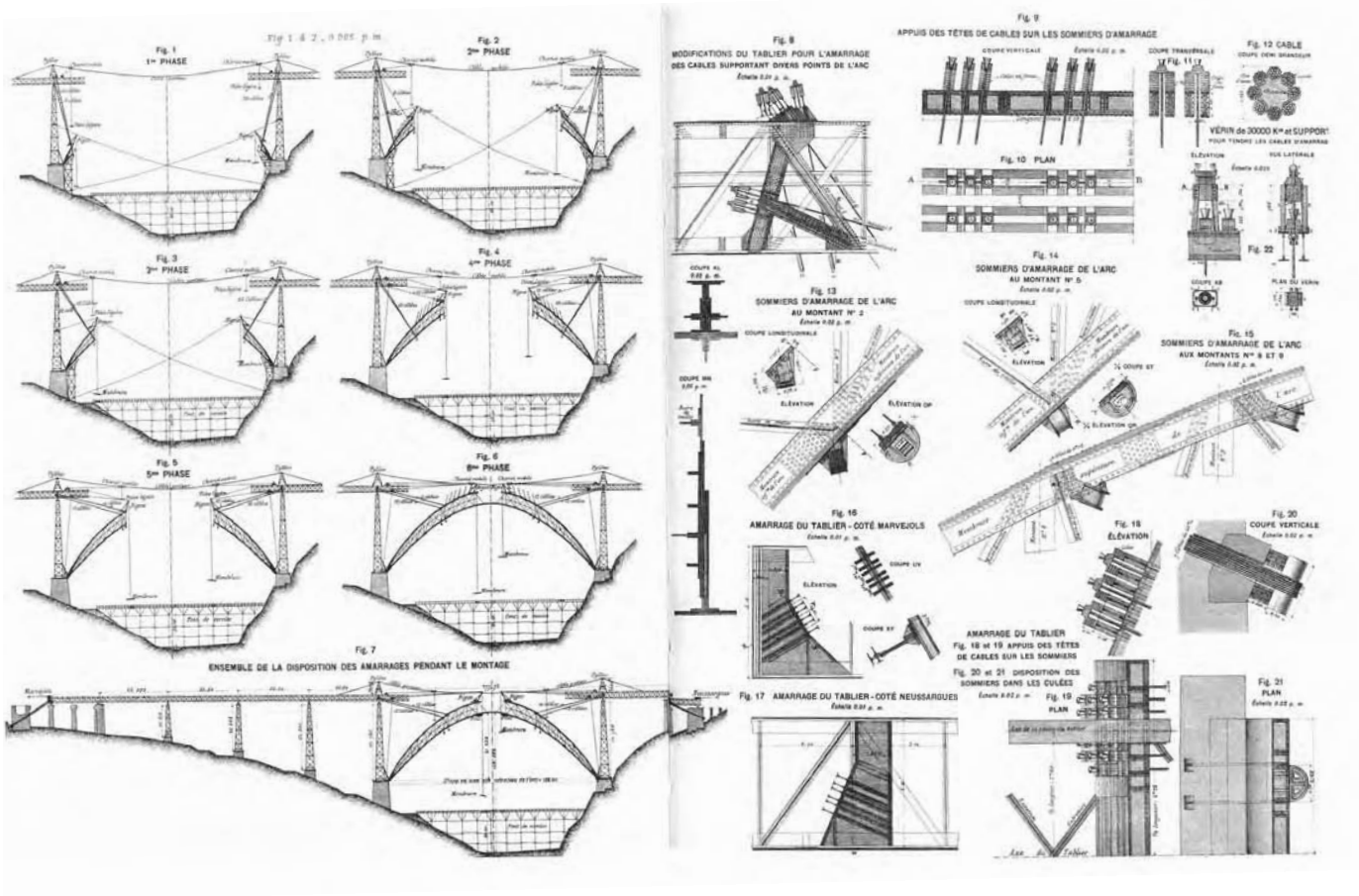


Fig. 1
1re PHASE
Fig. 2
2me PHASE
Fig. 3
3me PHASE
Fig. 4
4me PHASE
Fig. 5
5me PHASE
Fig. 6
6me PHASE
Fig. 7
ENSEMBLE DE LA DISPOSITION DES AMARRAGES PENDANT LE MONTAGE
Fig. 8
MODIFICATIONS DU TABLIER POUR L'AMARRAGE DES CABLES SUPPORTANT DIVERS POINTS DE L'ARC
Fig. 9
APPUIS DES TÊTES DE CABLES SUR LES SOMMIERS D'AMARRAGE
Fig. 10 PLAN
Fig. 11
Fig. 12 CABLE
VÉRIN de 30000 Kms et SUPPORT
Fig. 13
SOMMIERS D'AMARRAGE DE L'ARC AU MONTANT N° 2
Fig. 14
SOMMIERS D'AMARRAGE DE L'ARC AU MONTANT N° 5
Fig. 15
SOMMIERS D'AMARRAGE DE L'ARC AUX MONTANTS N° 8 ET 9
Fig. 16
AMARRAGE DU TABLIER - COTÉ MARVEJOLS
Fig. 17 AMARRAGE DU TABLIER - COTÉ NEUSSARGUES
Fig. 18
ÉLÉVATION
Fig. 19
PLAN
AMARRAGE DU TABLIER
Fig. 18 et 19 APPUIS DES TÊTES DE CABLES SUR LES SOMMIERS
Fig. 20 et 21 DISPOSITION DES SOMMIERS DANS LES CULÉES
Fig. 20
COUPE VERTICALE
Fig. 21
PLAN
Fig. 22

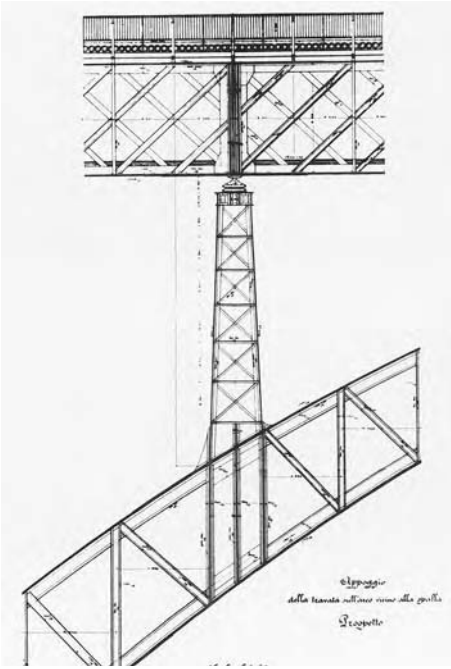
Viaducto de Mungsten sobre el valle del Wupper.

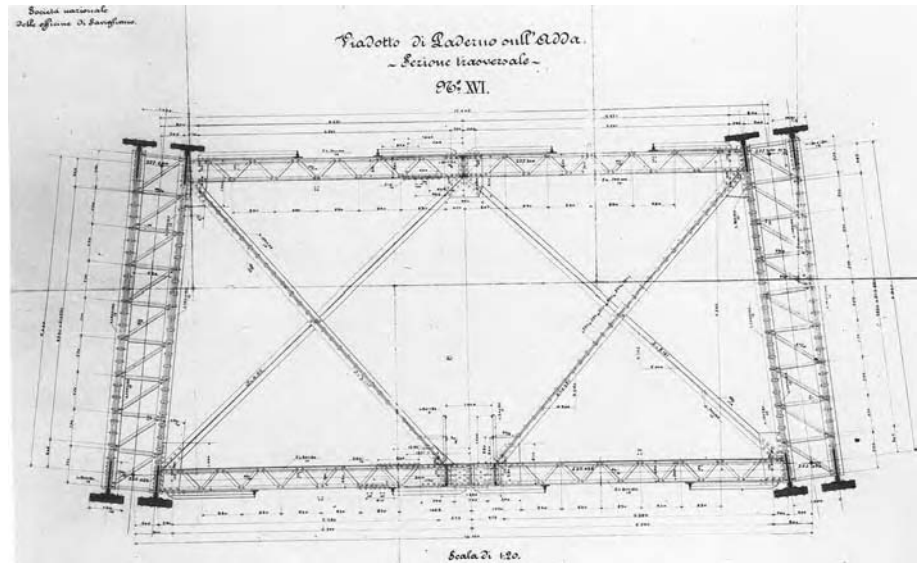
Para la construcción, Eiffel empleó el mismo sistema que ya había usado para su arco de Oporto y que Eads había iniciado en Saint Louis. El avance de los arcos por voladizos provisionalmente atirantados se estableció desde un principio como el método más idóneo para la construcción de grandes arcos. La configuración biarticulada de los arcos, como hemos visto íntimamente ligada al proceso constructivo, fue con mucho la más empleada por los arcos metálicos. Su análisis era también más sencillo que el de un arco empotrado en arranques. Habría que esperar a los avances en la capacidad de cálculo y la consolidación de conceptos fundamentales como el de la ductilidad para que el hiperestatismo se viese liberado del miedo e incertidumbre que lo rodeaban para empezar a ser considerado como la generalmente deseable cualidad estructural que hoy sabemos que es.

La configuración biempotrada es de hecho la que resulta en menores flexiones y a igualdad de material presenta mayor capacidad, aunque puede exigir en cambio mayores cimentaciones y un cuidadoso control sobre la influencia de la temperatura o los asientos en apoyos. Su mayor dificultad de análisis fue probablemente un freno para su empleo y, quizás, una de las razones por las que fue en Suiza, que acogía en esos momentos los mayores avances en el cálculo de estructuras, donde antes y en mayor medida se empleó esta configuración para el arco. Una realización excepcionalmente temprana es la del puente sobre el Aare de la línea Olten-Basilea, de 1856, aunque las mayores realizaciones habrían de esperar a Cullman, uno de los primeros defensores del hiperestatismo, y a la capacidad de cálculo que permitiría la estática gráfica que estaba germinando en el politécnico de Zurich.

Precisamente formado en esta escuela estaba Jules Röthlisberger, que proyectó y dirigió la obra del magnífico viaducto de Paderno sobre el Adda, en Italia, concluido en 1889. Su arco de 150 metros permitía salvar el valle al ferrocarril, por el interior de la viga del tablero, y a una carretera sobre su cordón superior. Los arcos biempotrados se adaptan peor a una construcción por voladizos sucesivos, al no permitir giros en arranques para el ajuste de la conexión de los dos semiarcos en clave, y el viaducto de Paderno, por ejemplo, se construyó sobre cimbra. Igualmente destacable es el viaducto de Müngsten para el ferrocarril austriaco, como el de Paderno biempotrado y con una configuración por lo demás análoga a la del viaducto de Garabit al que, con su luz de 170 metros, superó en 1897 convirtiéndose en el mayor arco construido para el tren. La solución biempotrada es la que, como veremos, se emplea generalmente en los actuales puentes de hormigón, material que se presta menos a la formación de rótulas.

Viaducto de Paderno sobre el río Adda en Italia (línea Seregno-Ponte S. Pietro, 1889). Imagen de la construcción sobre cimbra.
Plano del alzado parcial incluyendo tablero, montante de apoyo y arco.
Plano de detalle de la sección transversal del arco.





Gustave Eiffel (1832-1923)

Las grandes obras de Eiffel suponen algunos de los últimos ejemplos destacables del uso del hierro forjado, pues en las últimas dos décadas del s. XIX las mayores realizaciones acostumbraron a emplear ya el acero Bessemer. Suele argumentarse que Eiffel tardó más en emplearlo porque, como material nuevo y menos conocido, el acero no le inspiraba la confianza que sí le daba su amplia experiencia con el hierro, aunque probablemente también tuviera que ver en ello su doble faceta de proyectista y constructor; al fin y al cabo, el hierro era todavía un material considerablemente más económico.

Esta doble faceta también ha contribuido a alimentar un cierto debate en torno a Eiffel y la verdadera autoría de sus grandes obras. Es sabido que para los primeros viaductos empujados de su empresa y hasta el de Maria Pía en Oporto, buena parte del peso de los cálculos fue llevado por su socio Theóphile Seyrig y que, tras la rotura con éste, Eiffel contrató al ingeniero suizo Maurice Koechlin, que desde entonces encabezaría el departamento técnico de la empresa para proyectos como el de Garabit o el de la propia torre en Paris. No pocos historiadores, casi todos suizos, han reclamado para Koechlin, de brillantez innegable, el crédito como auténtico diseñador de alguna de estas admirables realizaciones y en particular de la torre. El conocido hecho de que Eiffel no pasase las pruebas para el ingreso en el prestigioso Politécnico de París, siendo graduado de hecho, y por ello, en ingeniería química y no civil, ha contribuido a esta estéril polémica; también lo ha hecho el testimonio, incluso en artículos de prensa, de empleados de la empresa en aquellos años, que han hablado de Koechlin como un callado pero genial ingeniero involucrado en el desarrollo día a día de los proyectos, estando en cambio Eiffel tan pendiente de éstos como de las citas obligadas de la alta sociedad parisina.

Cuando se construyeron el viaducto de Garabit o la torre de París, el propio Eiffel era ya un veterano y próspero ingeniero que acumulaba un gran prestigio y dirigía una importante empresa constructora, y no parece estrictamente necesario recurrir a historiadores para intuir que no pasaría ya las noches con su regla de cálculo sobre la mesa de dibujo. No pocos documentos de la época, sin embargo, han dejado constancia de su habilidad en los cálculos y, en lo que es más relevante, en el planteamiento conceptual y constructivo de las estructuras, del que parece innegable que nunca se desligó, independientemente de que fuese o no él en persona quien estuviese decidiendo el espesor de una u otra chapa de la torre Eiffel.

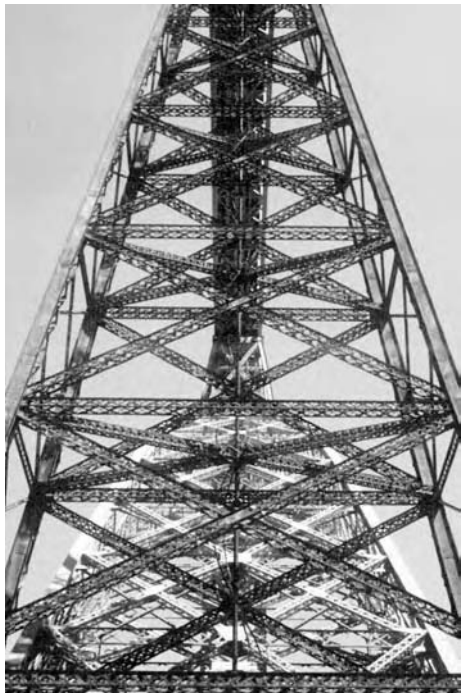
Sin cuestionar la valiosa contribución de Koechlin en los proyectos de la empresa, se ha dicho que cabe juzgar el grado de autoría que pudiera corresponderle por sus logros posteriores ya sin Eiffel, los cuales quedarían sin duda en una categoría inferior. No es éste un argumento carente de sentido, pues en efecto para crear obras que, como las

de Eiffel, son patrimonio de la ingeniería de todos los tiempos, la excelencia técnica es condición necesaria pero no suficiente.

Eiffel levantó una empresa que, partiendo de cero, acabó liderando la ingeniería y construcción de estructuras metálicas a nivel internacional, y para ello tuvo que hacer mucho más que generar sobresalientes diseños. No cabe duda de que buena parte de sus energías se invertirían también en las exigencias de las obras o de la consecución de destacados encargos, tareas de carácter con frecuencia no tan "creativo" pero igual de imprescindibles para que sus grandes obras viesen la luz. La habilidad de saber rodearse para todo ello de destacados colaboradores no debe mermar, sino quizás al contrario, el mérito del gran ingeniero francés.

Pueden esta serie de consideraciones ser extrapoladas a tantas otras grandes realizaciones que colman este escrito y que, por lo general, se asocian inevitablemente a un único nombre; claro está que en mayor o menor medida todas ellas han exigido, durante el diseño y la construcción, los méritos imprescindibles y con frecuencia anónimos de incontables colaboradores cuyas contribuciones, no por no recogidas, deben dejar de verse simbolizadas también en la persona de quien encabezó tan magníficos logros.

El arco y el tablero del viaducto de Garabit vistos a través de una de sus pilas.



Volviendo a los grandes puentes arco metálicos que el ferrocarril nos brindó, no en todos se materializó la triunfante combinación entre arco y celosía de igual manera. Tanto Eads como Eiffel habían empleado el arco como un elemento estructuralmente independiente que proporcionaba apoyo a los elementos verticales que soportaban el tablero, recurriendo a la celosía para proporcionar al arco la imprescindible capacidad a flexión que esta forma de trabajo requiere. En cambio ya a finales del s. XIX y principios del s. XX hubo destacadas realizaciones que retornaron a la idea de Telford del arco de tímpanos rígidos, a través de cuya triangulación el tablero superior pasa a colaborar con el arco a modo de viga de gran canto. Esta configuración permite que el elemento que conforma la directriz del arco trabaje puramente a compresión, liberándolo de las exigentes flexiones y por lo tanto de la necesidad de estar formado por una celosía.

Sin duda el más destacado de cuantos emplearon esta configuración fue el viaducto de Viaur que se concluyó en 1902 como parte de la línea entre Albi y Rodez. Los 220 metros que separan los arranques del arco suponen todavía hoy la mayor luz de un puente ferroviario en Francia. El diseño fue obra de Paul Bodin, que dirigía la empresa Batignolles, una de las grandes constructoras francesas de la época. El viaducto salva la gran luz central mediante dos semiarcos con tímpanos rigidizados por una triangulación tipo Pratt y unidos por una rótula en la clave, con la particularidad de que parte del peso de los semiarcos está compensado por sendos voladizos en los vanos laterales.

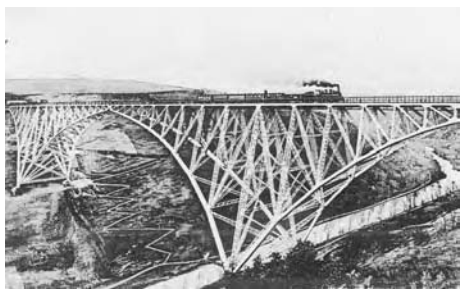
La celosía es por su mayor tamaño, de más limpieza y claridad que la de los arcos de Eiffel. A ello contribuye que el número de barras secundarías sea muy reducido, lo que evita que empañen el orden de la celosía principal, pero supone en cambio renunciar a acortar con ellas la longitud a pandeo de los largos montantes comprimidos, aspecto que se resuelve en este caso ejecutando estos elementos con un canto variable que se hace máximo en el punto medio, lo que resulta muy eficiente frente a la posible inestabilidad de los elementos sometidos a compresión. El que las diagonales traccionadas mantengan idéntica forma probablemente se debe a razones de homogeneidad visual y constructiva más que a motivos puramente estructurales.

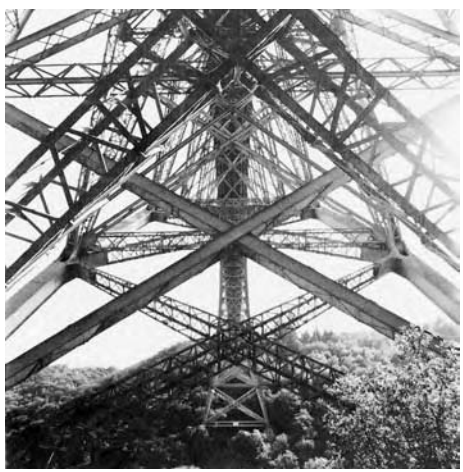
Para proporcionar resistencia frente al viento transversal, la geometría en planta, aunque bien proporcionada, presenta de nuevo muy marcadas variaciones, pasando de una anchura de apenas 6 metros para la vía única en coronación a los casi 35 metros en el apoyo en arranques. Esta máxima dimensión transversal supera en mucho los ya importantes 20 metros del viaducto de Garabit, lo que se entiende al considerar que la rótula central rompe la continuidad del tablero frente a las fuerzas transversales y hace que el puente trabaje ante ellas en dos grandes voladizos, lo que le resta eficiencia.

Otro tanto se ha llegado a decir de la flexión principal, la vertical, al considerarla también soportada por dos mitades trabajando como grandes vigas en voladizo. Esta incompleta lectura ha llevado incluso a que en ocasiones este puente se haya clasificado como un puente viga del tipo "cantilever" (de los que hablaremos más adelante) en el que sencillamente se ha prescindido del tramo central biapoyado. Interpretación incompleta porque obvia la fundamental consecuencia del contacto entre ambos voladizos en la rótula central, que más que contactar apoyan el uno sobre el otro. Esto moviliza la deseada compresión en las dos semibóvedas que conforma el cordón inferior, que no es sino la correspondiente a un arco triarticulado, principal mecanismo resistente del puente. La distribución de luces es coherente con este planteamiento, al presentar los vanos laterales una luz inferior a la de la mitad

(pag. dcha.)
Vista de un semiarco y la rótula en clave desde el fondo del valle. Cuadro del proceso de construcción por H.M. Magne.

Viaducto de Viaour en la línea entre Albi y Rodez (Francia, 1902). Con 220 metros de luz es todavía hoy el mayor puente ferroviario de Francia.





del vano central, lo que en definitiva equivale a decir que cada mitad del puente tenderá por su propio peso a inclinarse hacia el centro para apoyarse sobre la otra mitad. No lo hará, lógicamente, con la fuerza de todo el peso del vano central, que está en su mayor parte compensado por los voladizos laterales, y por eso frente al peso propio la estructura mezcla los mecanismos del arco y el voladizo, lo que explica que se haya clasificado en ocasiones junto a los puentes "cantilever" aunque su funcionamiento frente a las sobrecargas diste mucho del de éstos.

Todo ello liga directamente con el trascendental proceso constructivo por avance en voladizos sucesivos, íntimamente ligado a la configuración estructural del puente en lo que probablemente sea una de sus principales virtudes. En efecto, la propia triangulación de los tímpanos del arco que en su situación final busca evitar flexiones sobre éste, hace que durante la construcción cada mitad del arco por separado equivalga a una gran viga en voladizo capaz de soportarse a sí misma. O, dicho en otras palabras, la estructura esta concebida de forma que cada barra sea aprovechada tanto en la situación final como durante el decisivo proceso constructivo.

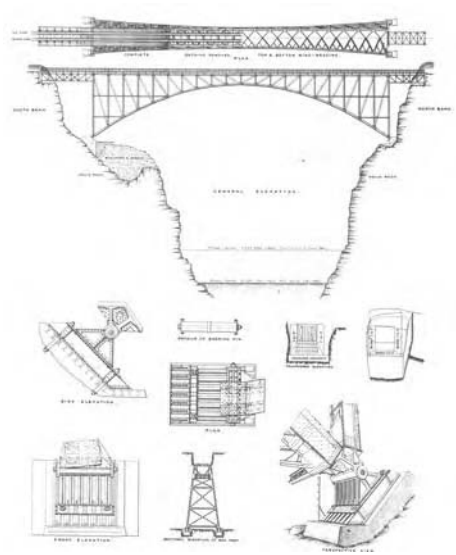
Probablemente en este hecho resida la mayor ventaja que permitió el importante salto de luz de este arco con respecto a los anteriores, tan dependientes de los delicados atirantamientos provisionales en los que se basaba su proceso de construcción y que suponían un freno hacia mayores luces además de una gran inversión en elementos inútiles para el puente final. En el viaducto de Viaur, en cambio, se pasa a poder prescindir de prácticamente todos los atirantamientos. No de todos porque la intencionada tendencia de cada mitad del puente a inclinarse hacia el centro tiene que ser contenida por pequeños tirantes durante las fases finales de construcción. Esos mismos tirantes liberan su carga una vez terminados los dos grandes voladizos para que, al pasar éstos a sujetarse mutuamente, entre en carga el mecanismo del arco que a partir de entonces toma el relevo de los voladizos en la tarea de soportar las sobrecargas sobre el gran vano central.

La épica de esta incomparable obra quedó excelentemente recogida por H. M. Magne en su cuadro del proceso de construcción, que ilustra a la vez la magnificencia del viaducto y el duro y arriesgado trabajo de quienes lo hicieron realidad. Aunque es de suponer que para ello el pintor acercó artificiosamente a los trabajadores a su punto de vista, pues sería preocupante que con lo avanzado del voladizo representado realmente hubiesen estado todavía ejecutando uniones en la zona de los arranques.

26 Nov. 1901

(página izquierda) Trabajadores sin vértigo durante la construcción por avance en voladizo del viaducto de Viaour.

Ejemplos de arcos con tímpanos rígidos triangulados: Alzado y detalles del puente de las Cataratas Victoria (1907). Puente de Crooked River en la ruta del Oregon Trunk Railway hacia California (1911).



Para salvar cañones y valles de gran profundidad resultó particularmente decisivo el desarrollo de la construcción en voladizo, a la que tan bien se adaptan los arcos con tímpanos rígidos. Otros ejemplos que en este sentido merece la pena mencionar son los del puente del Niágara, construido en 1897 con 168 metros de luz (sustituyendo al puente colgante de Roebling), o el del puente de las cataratas Victoria de 1907, construido en el corazón de África por el inglés Ralph Freeman (que más tarde diseñaría el mayor arco del mundo en Sydney). Cada mitad de su arco de 152 metros partió en voladizos sucesivos desde ambas escarpadas del cañón para unir en un escenario inigualable lo que entonces eran Rhodesia del Norte y del Sur (ahora Zambia y Zimbabwe). La conexión era una idea original del propio Cecil Rhodes como parte de una imperialista línea de ferrocarril a través del continente, de Ciudad del Cabo al El Cairo, pero su construcción tuvo que esperar a que el progreso en los materiales y las técnicas constructivas lo hicieran posible.

Pero los arcos no sólo han destacado por su eficiencia estructural sino también por la natural elegancia que confieren a los pasos que los emplean. No es de extrañar, por tanto, que cuando ya en la segunda década del siglo XX Gustav Lindenthal propuso sus alternativas para la construcción del gran puente de Hell Gate (para el paso del ferrocarril sobre el East River hacía Long Island) la opción preferida fuese la de un gran arco pese a que otras opciones barajadas basadas en grandes celosías o puentes cantilever se estimaban más económicas. Concluido en 1917 sería, con una luz de 298 metros, el mayor arco del mundo durante 15 años y uno de los últimos grandes puentes construidos para el ferrocarril norteamericano. Hoy se mantiene como el mayor arco que se haya construido nunca exclusivamente para ferrocarril.

Pese a sus claras ventajas para la construcción en voladizo, los arcos de tímpano rígido o triangulado pasaban por disponer el tablero sobre el arco y por lo tanto resultaban sólo idóneos en el cruce de grandes valles y cañones en los que de forma natural el cuerpo del puente se sitúa bajo la rasante. No eran en cambio aptos para el cruce de grandes cauces como el del East River en los que lógicamente la flecha de un gran arco con tablero superior supondría una elevación de la rasante inadmisible. Por eso la solución de Lindenthal para el Hell Gate fue una de las primeras en pasar a emplear el arco en celosía con tablero intermedio. Los puentes de ferrocarril sobre el Rin que se construyeron también en las dos primeras décadas del siglo XX son otros destacados ejemplos. La solución en estos casos volvió a ser la de un gran arco en celosía estructuralmente independiente del tablero, como los que Eads o Eiffel habían construido más de dos décadas antes, pero en los que el tablero colgaba del arco en lugar de apoyar sobre él.

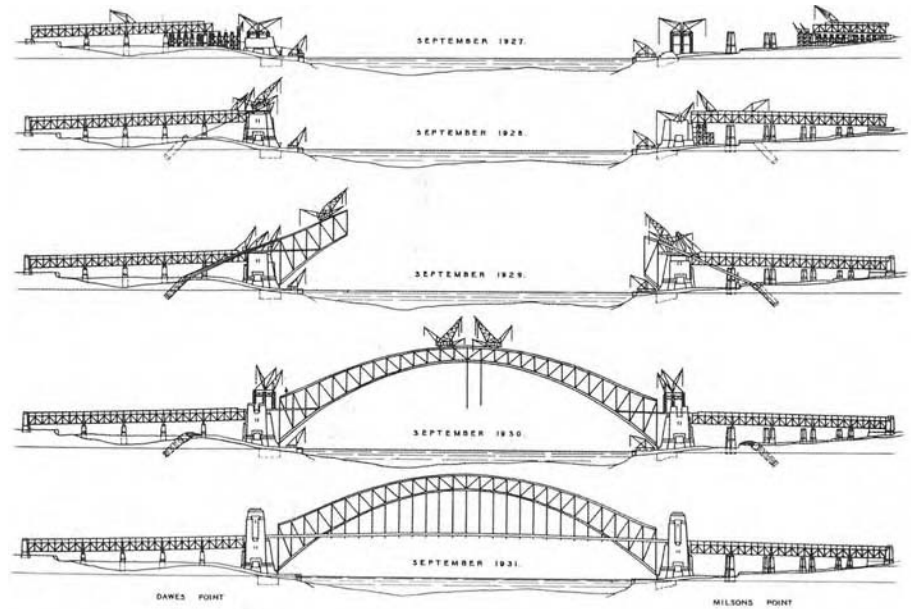
Puente de Hell Gate para el paso del ferrocarril sobre el East River (Nueva York, 1917). Imagen del puente, con sus creadores en primera línea entre los que se encuentran 3 de los más importantes ingenieros de puentes americanos de todos los tiempos: Gustav Lindenthal (en el centro con pelo y barba blanca) e inmediatamente a su derecha los que por entonces eran sus asistentes Othmar Ammann y David Steinman.
Momento previo al cierre en clave con los carros de avance y los atirantamientos provisionales perfectamente visibles.

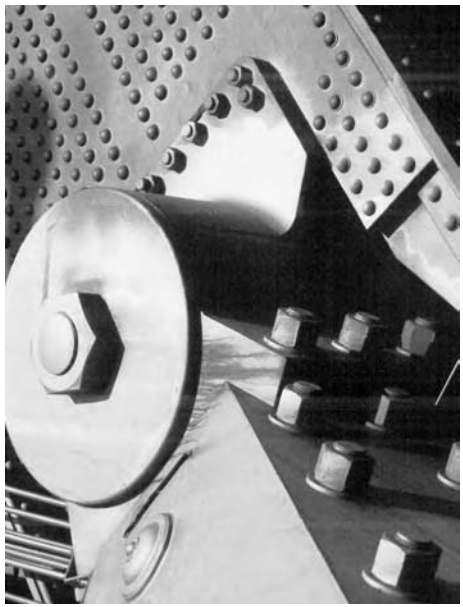
(página derecha) Puente arco de Sydney Harbour (1930). Nudo en la clave del arco. Vista superior del arco y detalle de la rótula en arranques. Esquema del proceso constructivo.

El arco, como la inmensa mayoría de los construidos hasta mediados del siglo XX, era de nuevo biarticulado aunque con una geometría muy diferente de la de los arcos en forma de luna creciente de Eiffel, pues al contrario que en éstos al llegar a los arranques el canto del arco de Hell Gate crece de forma marcada. Con ello se le conseguía dotar de una gran robustez visual, aunque en este caso debe remarcarse lo de "visual" porque, siendo biarticulado, las compresiones del arco se concentran en realidad sólo en el cordón inferior de la celosía al que poco ayuda el gran canto del arco en arranques. Estructuralmente el alma y el cordón superior juegan un papel secundario rigidizando al inferior, en particular frente a las flexiones producidas por las sobrecargas. Éstos parecen curvarse para apoyar sobre la piedra de los grandes estribos aporticados en una configuración atractiva que enfatiza la prominencia de la obra, pero realmente no hay entre ellos una transmisión de carga. En este sentido pueden los estribos interpretarse como no estructurales, aunque su función no es meramente visual como en ocasiones se ha dicho, pues sí contribuyen con su peso a la estabilidad de las cimentaciones que deben absorber los importantes empujes del arco.

Para la construcción, de nuevo en voladizos sucesivos, la forma adoptada sí resultaba estructuralmente ventajosa pues, al atirantar provisionalmente el cordón superior en arranques, permitía construir cada semiarco como una gran viga en voladizo empotrada en su inicio y con una variación de canto idónea. Con ello se consiguió construir el puente, cuya luz casi doblaba la del viaducto de Garabit, con un único tirante intermedio a lo largo de cada semiarco, además del principal en el arranque. Este empotramiento provisional se liberaba una vez finalizado el arco, que pasaba a apoyar sólo sobre las articulaciones del cordón inferior.

La elegancia arquitectónica del puente de Hell Gate inspiraría varios puentes posteriores, entre los que se encuentra probablemente uno de los más famosos del mundo: el puente sobre la bahía de Sydney, para ferrocarril y carretera. Conceptualmente análogo pero con un sobrecogedora salto en la luz hasta los 503 metros, el puente de Sydney es todavía hoy el mayor puente arco para el tren que existe. Durante 7 años su construcción se consideró una gran empresa nacional, lo que no es para menos a la vista de algunas de sus cifras: soporta la carga de 8 carriles de autopista y 4 líneas de ferrocarril además de dos pasarelas, durante la construcción por voladizos sucesivos piezas de hasta 120 toneladas se izaban desde barcazas mediante grúas en la punta de avance cuyo peso superaba las 550, y casi 15 veces superior fue el peso alcanzado para la prueba de carga que empleó 72 locomotoras. Finalizado en 1930, el uso mixto del puente de Sydney ilustra ya la importancia creciente del automóvil y se sitúa en un periodo en el que cada vez menos puentes de importancia se construirían para el ferrocarril.





Pero antes de adentrarnos en la era del automóvil, conviene volver la vista atrás hacia los últimos años del siglo XIX. Eads o Eiffel habían mostrado cómo el arco en celosía ejecutado en voladizos sucesivos provisionalmente atirantados podía permitir alcanzar y superar de forma eficiente las luces de las mayores vigas construidas hasta la fecha. Sin embargo, fundamentalmente por las limitaciones y exigencias de su sistema constructivo, no se preveía entonces que pudiese llegar mucho más lejos. Ya en 1867, Benjamin Baker había publicado un divulgado artículo en el que apuntaba hacia una solución para las grandes luces basada en que la estructura definitiva del puente estuviese orientada para trabajar de forma análoga a como lo haría durante la decisiva construcción (en sintonía con el modo en que se plantearían después nuevos arcos como el de Viaur). Su oportunidad llegaría cuando, tras la tragedia del puente del Firth of Tay, el proyecto del que había sido su diseñador, Sir Thomas Bouch, para un gran puente colgante sobre el Firth of Forth se puso inevitablemente en entredicho. En su lugar se optó, para el que era el mayor reto de la ingeniería hasta la fecha, por la solución que Baker venía defendiendo. Se llegaba así a la consolidación definitiva de los grandes puentes "cantilever". Éstos habrían de proporcionar a los puentes del tren algunos de sus más sobresalientes logros antes de que los caminos de asfalto empezasen a suplantar a los de hierro sobre los más importantes puentes de nueva construcción.

2.4. Puentes Cantilever

Los puentes viga comúnmente agrupados bajo la denominación anglosajona cantilever, que en Francia llaman "portes-à-faux" y que también se conocen como puentes de vigas Gerber en honor al ingeniero alemán que los empleó por primera vez, se basan en un concepto sencillo que de hecho se remonta a muchos puentes primitivos, de las culturas orientales particularmente, que partían desde ambos extremos de un paso con sendas construcciones en voladizo para después cerrarlo con un tramo central de luz reducida biapoyado en los extremos de las ménsulas.

Originariamente fue una vía de reducir a un valor admisible la luz a salvar por el tramo biapoyado, pero en sus primeras construcciones a finales de los años 70, Heinrich Gerber describió la solución que había patentado en 1866 como la de un puente en viga continua con articulaciones próximas a los puntos de momento nulo, de forma que se convertían en estructuras estáticamente determinadas, isostáticas. Ello simplificaba el cálculo y eliminaba incertidumbres acerca de los esfuerzos en los diferentes elementos del puente, a la vez que mantenía la rigidez y favorable distribución de momentos de una viga continua.

El isostatismo permite también, como es sabido, evitar que los asientos del terreno afecten a los esfuerzos en la estructura y, en los puentes de más longitud, anular igualmente posibles esfuerzos debidos a las deformaciones longitudinales por temperatura que pasan a concentrarse en las rótulas que son también juntas de dilatación (para lo que lógicamente éstas deben hacerse móviles o deslizantes).

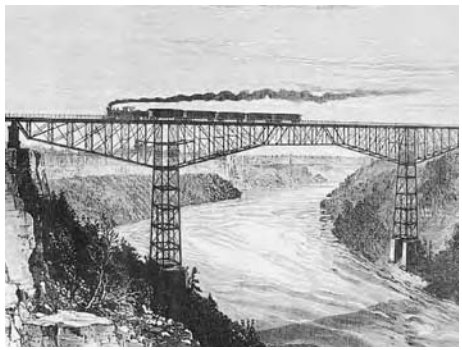
Sin embargo la mayor ventaja que llevó al éxito de los puentes "cantilever" para las grandes luces habría que buscarla, como ya se ha comentado, en su natural adaptación a la construcción por voladizos sucesivos, que permitía la decisiva eliminación de la cimbra o de otros costosos elementos auxiliares y provisionales que se venían empleando en la construcción en voladizo de los arcos. La propia estructura era capaz de soportarse a sí misma durante su progresiva construcción, en la que los esfuerzos que se producen son análogos a los de la estructura una vez completa y en servicio.

El desarrollo de los puentes "cantilever" no se dio hasta la llegada del acero. Las más tempranas aplicaciones para el ferrocarril hay que buscarlas en Norteamérica, con ejemplos como el del puente que Charles Shaler Smith construyó sobre el cañón del Niágara en 1883 para el Michigan Central Railroad, que ya salvó una importante luz de 143 m, o el similar puente sobre el río Frazer del Canadian Pacific Railroad, construido por C. Schneider un año después. Estos antecedentes llevaron en 1888 al puente de Poughkeepsie, primer gran "cantilever" que permitió al Central New England Railroad cruzar por primera vez el río Hudson en Albany, cerca ya de Nueva York. Fue con una longitud total de 2.063 metros con mucho la mayor estructura de acero hasta la fecha.

Puente primitivo en el Tíbet con más de dos siglos de antigüedad.

Puente para el paso del Michigan Central Railroad sobre el río Niagara (1983).

Puente de Poughkeepsie para el paso del Central New England Railroad sobre el río Hudson (1988).



Cuenta con dos vanos en celosía de 160 metros que alternan con otros tres vanos en cantilever de casi 168 metros que fueron en su momento los mayores del mundo no colgantes. Los importantes cantos varían entre 11 y 17.4 metros. Quedó fuera de servicio en 1974 tras un incendio y la compañía propietaria lo vendió a las autoridades locales por un dólar, aunque organizaciones de ciudadanos están tratando de recuperarlo como gran paso peatonal para la vía verde del valle del Hudson.

Aunque sin duda el más destacado de los puentes "cantilever", y también una de las obras de ingeniería más famosas del mundo, es el puente del Firth of Forth. Con unas dimensiones que empequeñecen cualquier precedente, su luz de 521 metros supone un asombroso salto de gigante que más que triplica la del mayor puente viga de ferrocarril hasta ese momento. Hoy se mantiene en servicio y es el segundo mayor puente viga del mundo.

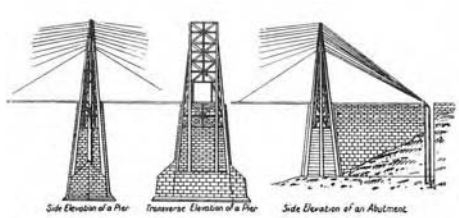
El estuario de Forth era junto con el de Tay el mayor obstáculo para la conexión de Edimburgo con el norte de Inglaterra. Durante muchos años los pasajeros del tren debían apearse para cruzar en ferry estas críticas interrupciones que reducían drásticamente la funcionalidad de la línea. El puente del Firth of Tay, del que ya hemos hablado y que es también famoso por motivos tristemente distintos, pudo construirse en 1871 pues, aunque más ancho, su profundidad era mucho menor y permitió luces convencionales apoyadas sobre un gran número de pilas. No era este el caso del Firth of Forth, en el que las profundidades alcanzaban los 60 metros. Tan sólo la pequeña isla de Inchgarvie permitía la cimentación de una pila intermedia, y ésta quedaba a casi 600 m de la orilla más próxima.

Pese a ello el cruce del Firth of Forth era un viejo sueño de la ingeniería Británica al que se había pretendido dar forma desde mucho tiempo atrás. Ya en 1818 el ingeniero escocés James Anderson había propuesto un puente atirantado con una luz de más de 600 metros en un diseño adelantado a su tiempo y muy audaz, tanto que de él se ha dicho que era *"tan ligero que difícilmente se hubiese visto en un día brumoso y, tras de una fuerte galerna, probablemente no se volvería a ver en un día claro tampoco"* [1].

Sesenta años después, en 1878, el diseño de Sir Thomas Bouch, ingeniero del North British Railway, para un puente colgante sobre el Forth había sido aceptado y las cimentaciones estaban de hecho en construcción cuando el desastre del Tay desacreditó a su diseñador lo que, junto con las dudas todavía existentes sobre la idoneidad de los puentes colgantes para el ferrocarril, frenó instantáneamente el proyecto. Se buscaba un robusto diseño de gran rigidez y capacidad que hiciese del puente no sólo el más grande sino también el más seguro del mundo.

[1] Sheyla Mackay. "The Forth Bridge. A Picture Story".

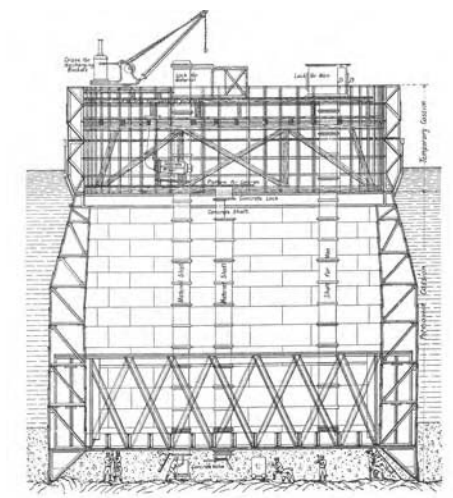
Propuesta de 1818 del ingeniero escocés James Anderson para un puente sobre el Firth of Forth. Los puentes atirantados modernos no llegarían hasta casi siglo y medio después, lo que refleja lo avanzado y osado de su idea, y ayuda a explicar porqué no pasó de eso.

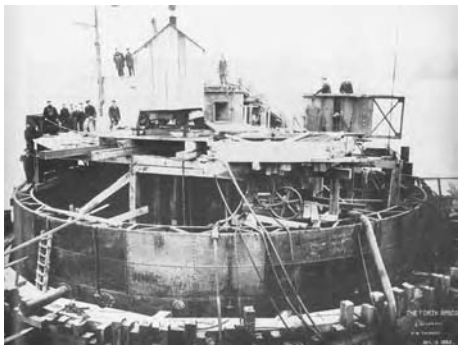


(en pág. derecha) Firth of Forth, Escocia (1890).

[2] Sheyla Mackay. "The Forth Bridge. A Picture Story".

Firth of Forth. Sección del cajón hincado empleado para la ejecución de las cimentaciones con los trabajadores excavando en la cámara de aire. Cajón metálico provisional exterior y cimiento de fábrica en el interior. Vista de los trabajadores sobre dicho cajón en diciembre de 1885. Apoyo noroeste de la pila de Queensferry.





Benjamín Baker, reputado ingeniero de puentes que trabajaba en la ingeniería dirigida por Sir John Fowler, tenía la solución. Fue él el primero en importar a Gran Bretaña, desde Estados Unidos y Alemania, el concepto de los puentes "cantilever", abogando en artículos y conferencias por esta tipología para las grandes luces. En 1881 Fowler y Baker hicieron su profundamente estudiada propuesta para el puente, transmitiendo una sensación de seguridad que les valió su nombramiento como ingenieros jefe para la construcción. El del Firth of Forth fue también el primer puente británico construido en acero, sorprendentemente tardío en comparación con las realizaciones americanas, aunque éstas venían empleando el acero Bessemer y el de Forth fue el primer puente que se construyó con acero Martin - Siemens. La construcción se inició en 1883 y no acabaría hasta 1889.

Todas las cifras del puente hicieron tambalearse a cualquier récord anterior y aún hoy se mantienen como las de uno de los más grandes puentes del mundo. El propio príncipe de Gales las resumiría en la ceremonia de inauguración:

"Quizás les interese si menciono algunos datos en relación con la construcción del puente. Su longitud total, incluyendo los viaductos de aproximación, es de 2.528 metros, y su parte en "cantilever" alcanza los 1.628 metros. El peso de acero empleado suma 51.000 toneladas y la máxima altura de la estructura sobre el nivel de agua es de 113 metros, 138 si se mide desde la base de la cimentación más profunda, siendo la altura de la propia vía de 48 metros sobre el nivel de agua. En torno a 8 millones de roblones se han empleado en el puente y 68 kilómetros de placas laminadas conforman los tubos, aproximadamente la distancia entre Glasgow y Edimburgo (…). Estas cifras les darán una idea de la magnitud del trabajo y les ayudaran a entender el esfuerzo y ansiedad que todos los involucrados en él han tenido que vivir." [2]

La obra se inició lógicamente con la excavación de las cimentaciones para las tres grandes torres, algunas de las cuales se encontraban muy próximas a las anteriormente iniciadas para el rechazado puente suspendido de Bouch. La ejecución de los 12 cimientos, 4 por pila, no fue más laboriosa que en puentes anteriores pues un adecuado apoyo rocoso no se encontraba muy profundo y, además, la técnica de los cajones neumáticos había progresado con avances como el de las lámparas eléctricas, que acabaron con los riesgos de trabajar con fuego en recintos con aire comprimido. Cada uno de los 4 apoyos de una torre, menudo como parece en las vistas generales del puente, tenía un diámetro de más de 20 metros.

Una vez los cajones se rellenaron con sillería de granito para completar los basamentos para el apoyo de las 3 torres, éstas se levantaron con sus 4 grandes patas inclinadas, rigidizadas con contundentes cruces de San Andrés. Nacían con una anchura de 36.6 m en su base para aproximarse a sólo 10 metros en coronación. Desde cada una de ellas

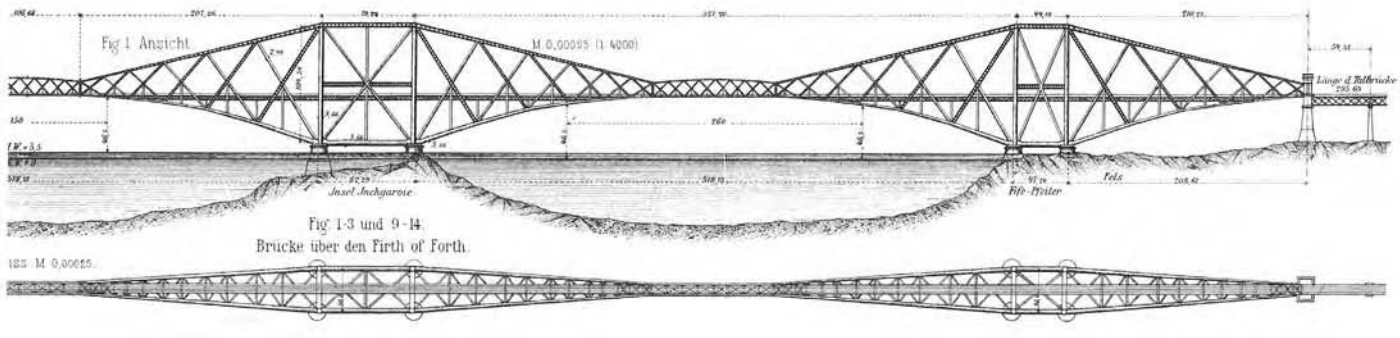
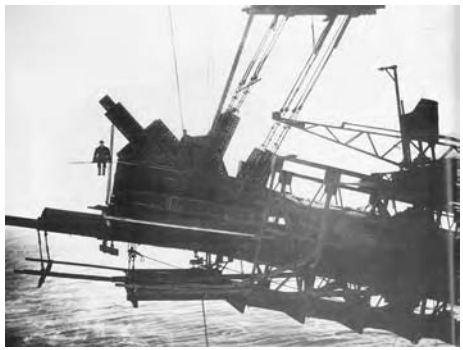


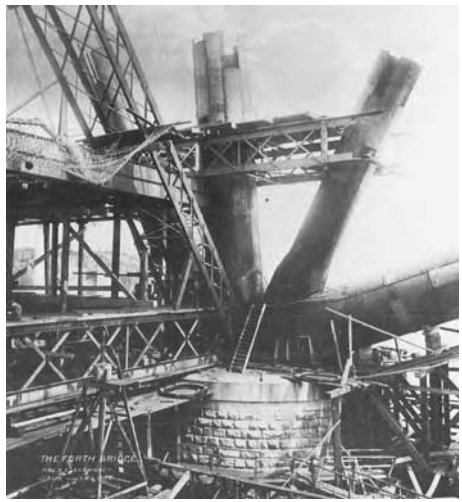
Fig 1 Ansicht
M 0,00025 (1:4000)
Insel Inchgarvie
Fig 1-3 und 9-14.
Brücke über den Firth of Forth.

(en pag. derecha) Firth of Forth. Vista general del avance de los voladizos en 1889.

Un trabajador sentado en el extremo del cordón inferior en proceso de montaje.

Uno de los 4 apoyos de cada pila empieza a crecer sobre el cimiento en Julio de 1887.





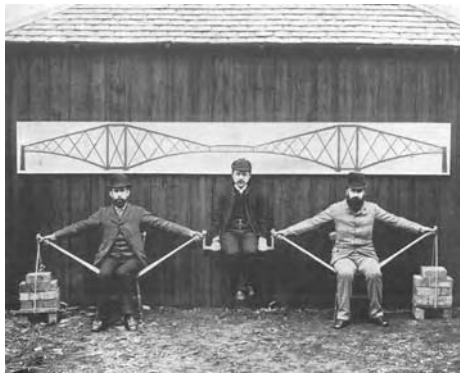
partieron simétricamente los dos voladizos, que autoequilibrándose avanzaban hacía los que crecían en las pilas vecinas. El cordón inferior de los voladizos trabajando a compresión estaba formado por dos grandes tubos que adoptaban una ligera curva para alcanzar ya horizontales el tramo central y por cuyo interior, de 3.6 metros de diámetro, cabría sin problemas un pequeño camión. La forma tubular está plena de sentido para elementos comprimidos enfrentados al pandeo, pues a igual cantidad de material es la sección que más inercia en dos direcciones alcanza, al ser lógicamente la que consigue alejar más el material de su centro de gravedad. A las ventajas de esta forma para la estabilidad global se añaden además las que la curvatura de la chapa supone frente a la inestabilidad local o abolladura.

El cordón traccionado, que se mantiene recto en cabeza del voladizo, queda liberado del riesgo de inestabilidades, lo que permite un mejor aprovechamiento del material, de ahí que la ligera celosía que lo forma contraste con la potencia del cordón comprimido. Esta distinción, de gran valor didáctico, se refleja por igual en las almas donde la configuración de cada diagonal expresa su forma de trabajo. La celosía empleada es una doble warren, también llamada celosía en rombo, cuya limpieza, dada la envergadura del puente y el elevado número de barras secundarias, sólo resulta apreciable si se contempla su alzado desde la lejanía.

Toda la fabricación de la estructura metálica se llevó a cabo en lo que realmente se convirtió en un pequeño pueblo industrial construido específicamente para albergar junto a sus familias al ejército de más de 4.000 trabajadores. Los contratistas liderados por William Arrol organizaron toda una flota de barcos que desde los talleres transportaban las piezas hacia el puente en crecimiento. Botes de rescate se mantenían también patrullando de forma continua en torno a cada voladizo, lo que sirvió para salvar no menos de ocho vidas y recuperar muchos miles de prendas y gorros, para cuya sustitución por los hoy imprescindibles cascos habrían de pasar todavía muchas décadas.

Los "pequeños" tramos centrales biapoyados, llamados tramos de cierre, salvan una luz de 107 metros y fueron también construidos en dos mitades en voladizo, para lo que obviamente fue necesario materializar un empotramiento provisional en sus apoyos que una vez terminada la viga, pasarían a liberarse para permanecer articulados. La longitud que se llegó a volar en ménsula durante la construcción fue por tanto de más de 260 m.

El momento de unir en su mitad el tramo de cierre era especialmente delicado, pues exigía tener en cuenta los grandes desplazamientos que podrían derivarse de las dilataciones térmicas en una tan larga estructura. El proceso ideado pasaba por unir, en



Pocas veces una imagen ha recogido de forma tan intuitiva el funcionamiento de una estructura como el famoso cantiliver humanizado que Baker ideó para explicar su gran obra en sus clases y conferencias.

un momento de temperatura media, los cordones del tramo de cierre en su punto central para liberar a continuación las uniones provisionales en los extremos del tramo que habían proporcionado el necesario empotramiento durante su construcción, quedando así el puente libre para dilatarse y contraerse sin generar tensiones. Este proceso era muy dependiente de las deformaciones térmicas, e incluso en algún caso fue necesario encender fuegos para dilatar la estructura y aproximar los elementos a unir de ambos tramos.

Pero el momento de mayor preocupación llegó cuando en uno de los voladizos se presentó un problema que impidió completar a lo largo del día la unión en mitad del tramo de cierre, con lo que ésta quedo a medio hacer sin que pudiesen por tanto liberarse las fijaciones provisionales de sus apoyos, lo que hizo que muchos de los responsables pasasen la noche en vela esperando que la temperatura no descendiese lo suficiente como para que la contracción de la estructura comprometiese alguna de las uniones. Por fortuna no fue así y al día siguiente pudo completarse la conexión y soltar las fijaciones que impedían la libre contracción de la estructura. El susto en cambio llegaría una vez se había completado la unión del siguiente tramo de cierre pero las fijaciones provisionales todavía no habían acabado de retirarse; un repentino descenso de la temperatura hizo que los roblones pendientes de ser retirados se rompiesen con un ruido atronador que hizo vibrar toda la estructura y el ánimo de la mayoría de los presentes, aunque ello no tuvo mayores consecuencias. Baker restaría peso al suceso, que la prensa había exagerado, explicando que todo cuanto había pasado es que se habían ahorrado el trabajo de retirar algunos de los remaches provisionales.

Al no contar los voladizos laterales con el peso de los tramos centrales, para mantener la carga en las pilas laterales centrada y evitar despegues en los extremos del largo tablero, fue necesario añadir en éstos un lastre formado por miles de ladrillos de hierro fundido que proporcionaron un contrapeso de casi 1.000 toneladas convenientemente oculto en los estribos aporticados de piedra.

De forma anecdótica, y pese a que el progreso tecnológico en el siglo XIX fue liderado por Occidente, posiblemente sea el japonés Kaichi Watanabe el personaje cuya imagen ha resultado más imprescindible en casi cualquier libro sobre puentes de la época y aún de todos los tiempos. Alcanzaría inadvertidamente este lugar en la historia de la construcción cuando, en su viaje de estudios a Inglaterra, fue a posar como improvisado tramo de cierre en la interminablemente reproducida fotografía del símil humano del funcionamiento del Firth of Forth. De innegable valor didáctico, la imagen explica por si sola, por ejemplo, el papel de los contrapesos en extremos antesdescritos. Baker la empleaba en sus clases y conferencias para describir de forma lograda e intui-

William Arrol (1839-1913), el constructor. John Fowler (1817-1898), el experimentado ingeniero consultor. Benjamín Baker (1840-1907), el diseñador.

tiva el funcionamiento estructural de su gran obra, y muchos después de él han seguido haciéndolo.

El puente se inauguró oficialmente en marzo de 1890 y fue visto en todo el país como el más grande logro de la ingeniería británica cuya amenazada hegemonía reclamaba un símbolo como el del Firth of Forth. Si Brunel y Stephenson habían sido los grandes y arriesgados innovadores, fueron Fowler y Baker los que, desarrollando técnicas anteriores, habrían de legarnos la más poderosa muestra de la ingeniería victoriana, madre del ferrocarril.

Aunque el sentimiento predominante fue de justificado orgullo y admiración, la obra no estuvo exenta de críticas por parte de quienes la consideraron de envergadura y robustez exagerada. El puente, en efecto, no cuenta con la esbeltez entre sus muchas cualidades y pocos al verlo tendrán la sensación de que su estabilidad corra algún peligro. Estas consideraciones no deben separarse por otro lado de las circunstancias que rodearon el diseño, que triplicaba cualquier luz anterior de un puente viga con un material novedoso y muy poco después del trágico colapso del Tay Bridge. Sin duda, todo ello influyó en muchos de los conservadores parámetros empleados, entre los que llama la atención la presión de viento considerada, de nada menos que 270 kp/m2, y una limitación de la tensión en el acero, para cargas máximas, de sólo 240 MPa, poco más de un 40% de la tensión de rotura que se le exigía. Valores cuyo conservadurismo se torna razonable al considerar las circunstancias que rodearon el diseño y el reto sin precedentes que esta obra suponía y del que Baker era plenamente consciente cuando decía: *"Si pretendiese que el diseño y construcción del puente de Forth no fue una fuente de presente y futura ansiedad para todos los involucrados, ningún ingeniero con experiencia me creería. Cuando no existe precedente, el ingeniero triunfante es sólo el que comete los menos errores"* [3].

Muchos puentes cantilever siguieron al puente del Firth of Forth. En Europa destaca el puente de Connel, con una interesante configuración de las pilas o el de Rendsburg de 1913 en Alemania, que además de puente de ferrocarril era un transbordador. Aunque sin duda donde esta tipología proliferó en incontables realizaciones fue en Norte América. El Forth, sin embargo, se mantuvo como la mayor luz del mundo durante 27 años, hasta que tan privilegiada posición le fue arrebatada por el puente de Québec, también cantilever, aunque no se puede decir que éste superase al del Forth en muchos más aspectos. Más bien al contrario, es una obra que, aunque magnífica en su envergadura, no alcanza la robusta elegancia del puente británico y cuya construcción, perseguida por la desgracia, estuvo muy lejos de poder considerarse triunfal como la de éste.

[3] Sheyla Mackay. "The Forth Bridge. A Picture Story".

Puente de Connel (línea Sheffield-Manchester, 1903).

El viaducto de Rensburg sobre el canal de Kiel es a la vez puente ferroviario y transbordador (Alemania, 1903).

Puente de Pittsburg & Lake Erie sobre el río Ohio (Pennsylvania, 1910).

(derecha) Puente de Memphis, sobre el río Mississippi, flanqueado por sendos puentes carreteros posteriores (Kansas City & Memphis Railroad, 1892).

Tras trabajar con el mismo James Eads en el puente de Saint Louis, Theodore Cooper había desarrollado una meteórica carrera que le llevó a ser uno de los más reputados diseñadores de puentes de Norteamérica. En 1899, recibió el encargo de proyectar un gran puente de ferrocarril en Québec sobre el que, tras el sistema formado por el Missouri y el Mississipi, es el segundo mayor río de Norte América, el St. Lawrence. Tras considerar la posibilidad de construir un puente colgante, el precedente del Forth y otros exitosos puentes cantilever llevaron a Cooper a reproducir esta configuración en un puente que inicialmente iba a tener una luz de 488 metros, que posteriormente se aumentaron a 549, lo que suponía la mayor luz del mundo al superar al puente del Forth, pero supuso tristemente también el primer eslabón de una fatal cadena de decisiones en la que las presiones financieras, que llevaron a recortar al máximo la cantidad de materiales, y la elevada edad del propio Cooper, que le mantuvo lejos de la obra durante la construcción, fueron también factores determinantes.

Puente de Québec sobre el río St. Lawrence (1917). Situación del voladizo poco antes de su colapso.

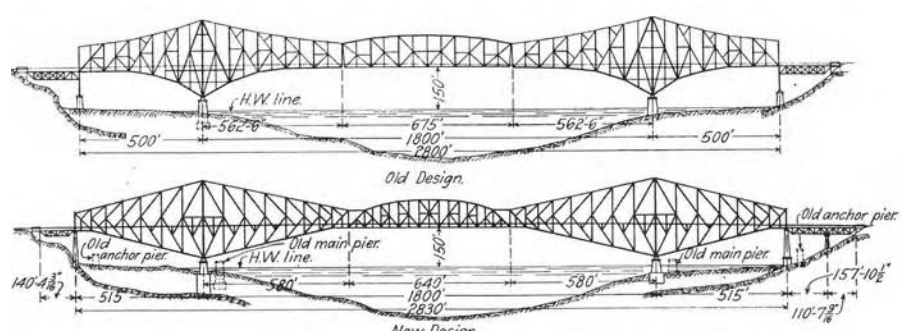
Mortales amasijos de acero tras la catástrofe, escalados por las apenas perceptibles figuras humanas que lo observan.

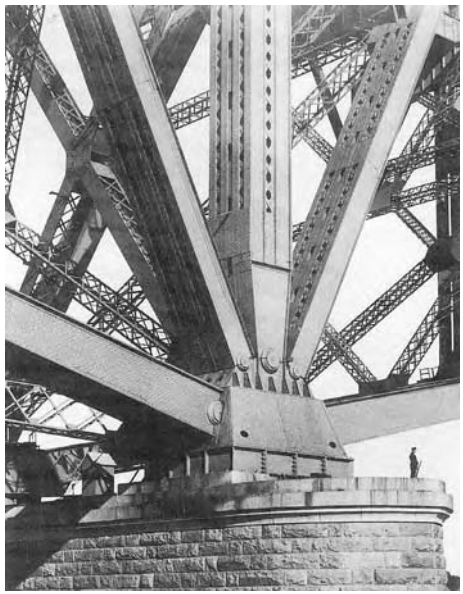
Vista del puente definitivo.

(derecha) Planos comparativos del primer puente fallido y del puente definitivo, ambos basadas en una celosía en "K", reservada en general para las grandes luces.

Tras más de tres años de construcción, uno de los voladizos había alcanzado los 230 metros cuando se detectaron señales de abolladura en los cordones inferiores comprimidos. Sin que los responsables de la obra estuviesen seguros de si estas señales estaban presentes desde un principio o se habían producido durante el avance del trabajo, una ineficaz serie de telegramas se puso en marcha, a la vez que se optó por viajar a Nueva York en busca de la opinión del propio Cooper. Inexplicablemente no se detuvo el avance del voladizo y sus carros de montaje sobre los que seguían trabajando intranquilos obreros entre los que había corrido ya la voz de los defectos detectados. Seis días después de que apareciesen los primeros signos de abolladura, Cooper recibió en su oficina neoyorquina la noticia de boca de uno de los responsables que había viajado desde Québec e inmediatamente ordenó que se parase todo añadido de carga al puente hasta nueva orden. Su telegrama de la mañana no llevó sin embargo a ninguna acción urgente en la obra, y esa misma tarde, cuando quedaba un cuarto de hora para el final de la jornada, las 19.000 toneladas del voladizo se precipitaron sobre el río con un estruendo que pudo oírse en el mismo Québec, 6 millas aguas abajo. Algunos testigos describieron cómo la caída, lenta en un principio, estuvo envuelta por el sonido ametrallador de la rotura incesante de cientos de roblones. Ochenta y cinco hombres se precipitaron con el amasijo de acero y hierro. Sólo once sobrevivieron.

El accidente supuso el fin de la carrera de Cooper, que no pudo sino arrepentirse de las críticas que anteriormente había hecho sobre la excesiva robustez del puente del Firth of Forth, cuyo contraste con la mucho más ligera estructura que muestran las fotos del puente de Quebec previas al colapso es patente.





Puente de Québec. La vista del soldado junto a la base de la pila da escala a la magnífica envergadura del puente.

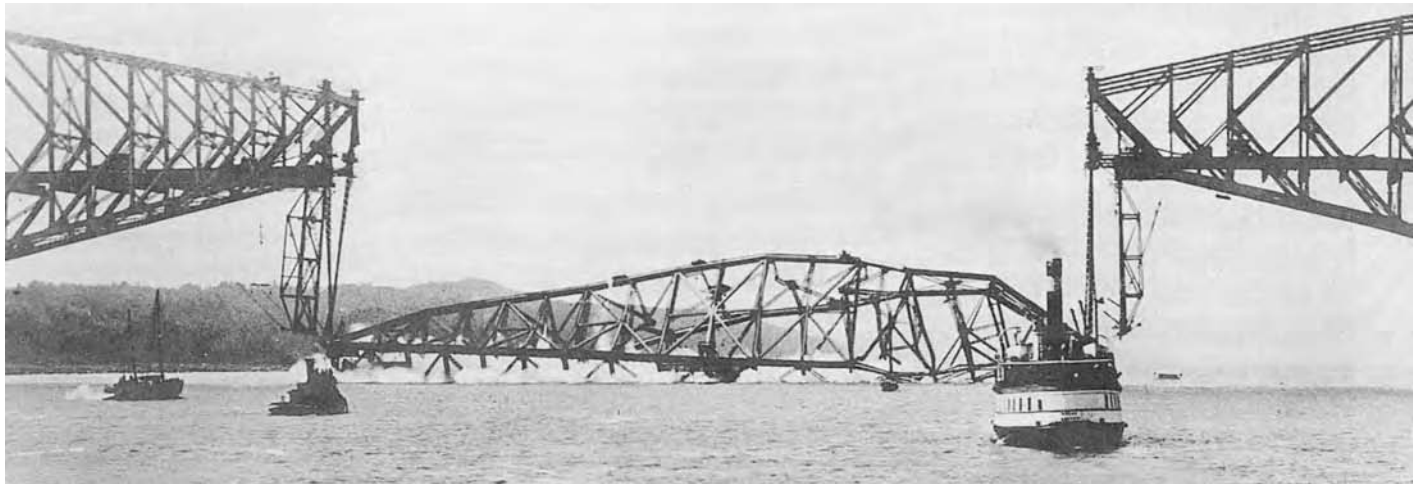
El puente de Huey P. Long sobre el Mississippi permitió la al ferrocarril cruzar el río para llegar a Nueva Orleáns sin necesidad de subirse a los ferries que usó durante más de medio siglo hasta que la construcción del puente fue posible (Lousiana, 1935).

(pag. derecha). Vista de la elevación del tramo central del puente de Quebec y de su trágico colapso.

[4] W.D. Middleton. The Bridge at Quebec

El diseño para un segundo puente incluía más del doble de acero de lo que se había previsto para el puente original, reemplazando también la insustancial curvatura de sus cordones por la no más agraciada firmeza de potentes y sencillos cordones rectos. Se renunció asimismo a construir el tramo central prolongando el voladizo, para pasar a prefabricarlo en la orilla y flotarlo después para su posterior izado. Durante éste, casi diez años después del primer desastre, y pese al especial cuidado que a raíz de éste cabría esperar, el tramo de cierre completo se vino abajo, y junto con sus 5.200 toneladas de hierro cayeron al agua once hombres cuyas vidas se sumaron al alto precio humano que se pagó para que en 1917, tras casi quince años desde el inicio de las obras, el tren cruzase finalmente el gran cauce del St. Lawrence sobre el mayor puente del mundo. Hoy este puente sigue proporcionando un vital servicio al ferrocarril canadiense como el de mayor luz entre los de su clase y, pese a su trágica historia, o quizás por ella, se considera *"el símbolo primario de la ingeniería canadiense, memoria de las fuerzas y debilidades del espíritu humano, del atrevimiento de los constructores canadienses, y de cómo la tenacidad puede triunfar sobre la dificultad"* [4].

La construcción de los puentes "cantilever" se ha prolongado a lo largo del siglo XX básicamente en Estados Unidos, donde se usaron por doquier para salvar los grandes cauces con obras que, habitualmente, han destacado más por su eficiencia estructural y constructiva que por su elegancia formal. Con frecuencia estos puentes se confunden con una viga continua en celosía, pues las rótulas, aunque estructuralmente presentes, quedan visualmente escondidas. Uno de los más destacados ejemplos es el puente de Huey P. Long sobre el río Mississippi, que proporcionó en 1935 el paso que desde tiempo atrás reclamaba un ferrocarril que llevaba muchas décadas cruzando el gran cauce en ferry para acceder a Nueva Orleáns. Tiene una luz de 240 metros y su longitud de más de 7km lo convierte en el más largo puente de ferrocarril de América. La de los puentes cantilever es en cualquier caso una tipología cuyo uso hoy se ha abandonado casi por completo también en Estados Unidos, pues en su rango de luces han quedado desplazados por lo modernos puentes atirantados. Cabe destacar, sin embargo, que si bien en el caso de la carretera los puentes atirantadas salvan hoy luces de 800 metros, en lo que se refiere al ferrocarril, no se ha construido ninguno que salve para el camino de hierro una luz que supere los más de 500 metros de los dos grandes cantilever británico y canadiense. Para que los trenes volasen sobre luces mayores sólo ha existido hasta hoy una tipología: la de los puentes colgantes.



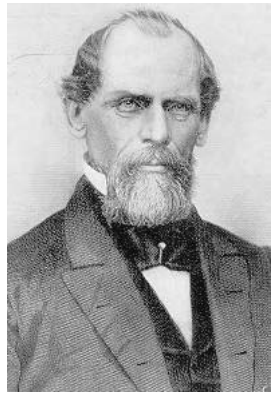
2.5 Los puentes colgantes

Muy pocas veces en la historia de la ingeniería estructural se ha dado un caso en el que un solo hombre desafiara toda una corriente establecida de forma tan tajante y exitosa como en el caso de los puentes colgantes para ferrocarril y la irrepetible figura de John Roebling, con cuya vida y obra está en deuda cualquier construcción suspendida o atirantada desde 1850 hasta ahora.

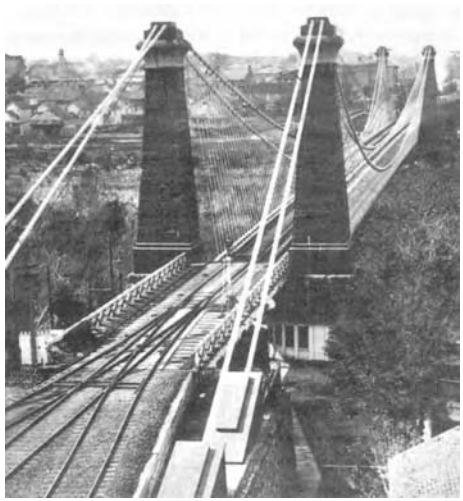
El concepto de la suspensión es milenario, aunque cabría situar el inicio de la aplicación moderna de los puentes colgantes a principios del siglo XIX, con la aparición de figuras pioneras como Finlay, Telford, Navier o Brown. El mismo Samuel Brown que en la década de los años 20 del siglo XIX había diseñado varios exitosos puentes colgantes para caminos y carreteras, fue el primero, en 1830, en construir uno para una línea ferroviaria, de hecho para la primera, que había sido abierta en 1825 entre Stockton y Darlington. El puente, que cruzaba sobre el río Tees con una luz de 85 metros, se comportó sin embargo de forma muy diferente a como venían haciéndolo anteriores diseños que sólo debían soportar el peso de carros y carretas, pues el paso de las locomotoras producía en toda la estructura deformaciones tan imprevistas como inadmisibles; tanto es así que el mismo Brown afirmaría: *"No me parece que se puedan emplear los puentes colgantes como viaductos ferroviarios. En Stockton teníamos uno que ofrecía condiciones alarmantes: Cuando la locomotora y el tren entraban en él se producía frente a la máquina una onda de cerca de dos pies (60 cm) de altura, casi un parapeto"* [1]. El propio Robert Stephenson se vio obligado a sustituir el puente poco tiempo después por otro de vigas.

[1] Citado en J. J. Arenas: Caminos en el Aire. Los puentes. Vol. 1. Colegio de I.C.C.P.

John Augustus Roebling (1806-1869).



La premisa de que los puentes colgantes no eran viables para el paso del ferrocarril se extendió y fue aceptada de forma generalizada. En efecto, el puente colgante es, como el arco, una estructura que resiste gracias a su forma. Su mecanismo resistente se basa exclusivamente en la tracción del que es uno de los más eficaces y atractivos elementos resistentes que se hayan inventado, el cable. Por su extrema flexibilidad, que lo hace incapaz de resistir momentos, el cable es por otro lado uno de los elementos estructurales de más complejo uso. Ante cualquier sistema de fuerzas, y dada su total falta de rigidez, el cable suspendido adoptará la forma necesaria para que en él sólo se produzcan equilibrados esfuerzos de tracción pura. Forma ésta que no será sino la curva funicular del sistema de cargas, con la que el cable coincidirá en todo momento. Dado que las sobrecargas actuantes en un puente son variables, el cable deberá cambiar de forma para ajustarse a cada situación de carga diferente, lo que explica por qué los puentes colgantes en su esquema conceptual son tan deformables, y por qué dicha deformabilidad se acentúa más cuanto más concentrada y pesada es la carga actuante, o, puesto de otro modo, cuanto ésta más se parece a la de una locomotora.



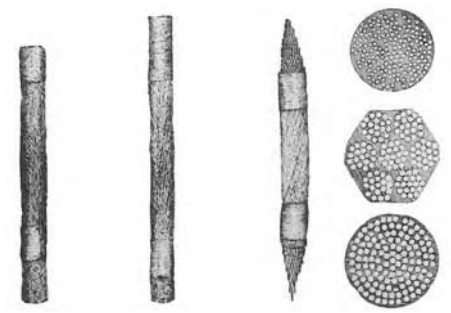
El puente colgante sobre el Niágara (Estado de Nueva York, 1855).

Por supuesto, existen vías para mitigar y controlar dicha deformabilidad, que generalmente pasan por proporcionar una gran rigidez al tablero, de forma que éste sea capaz de repartir las cargas concentradas antes de que éstas se transmitan al cable, lo que permite reducir los desplazamientos del conjunto. Probablemente el primero en explorar este concepto fue el polivalente ingeniero francés Marc Seguin, primero en sustituir las cadenas de las que colgaban los puentes pioneros por cables formados con alambres. Arropado por sus hermanos, Seguin repitió en 1840 el intento de un puente colgante para ferrocarril, que salvaba 42 metros de luz sobre el río Saône, y cuyo rígido tablero en celosía posibilitó el paso del ferrocarril de modo provisional durante un tiempo, hasta que se completó el definitivo puente de piedra. El comportamiento del puente fue problemático pese a lo breve de su servicio, y la idea generalizada de lo inadecuado de los puentes colgantes para el ferrocarril se mantuvo firmemente arraigada. Sólo la genialidad y determinación de John Roebling, unidas a la imperiosa necesidad de conectar las líneas ferroviarias neoyorquinas con las que se estaban desarrollando en el sur de Ontario, al otro lado de la gran garganta del Niágara, acabarían con esta supuesta limitación de la ingeniería estructural.

Cuando la compañía para la construcción del puente del Niágara se formó en 1846, Roebling ya había consolidado su negocio para la fabricación de cables y contaba en su haber con relevantes puentes colgantes, pero el contrato para la construcción del puente del Niágara sólo le llegó tras la renuncia por disputas con la compañía propietaria del que era y seguiría siendo su gran rival en la construcción de puentes colgantes en Norte América, Charles Ellet.

Para salvar la garganta de 250 metros y más de 60 metros de profundidad hasta el río, cualquier precedente en la construcción de puentes de ferrocarril resultaba inviable, pues la máxima luz salvada por una locomotora, en el puente de Britannia, apenas superaba la mitad de la luz que ahora se planteaba, y lógicamente los turbulentos rápidos y grandes bloques de hielo que llegaban a formarse en el río hacían impracticable la posibilidad de levantar una pila sobre el cauce en el fondo de la garganta. Aún así, una de las alternativas estudiadas se basaba en una sección en cajón metálico como la que Stephenson estaba empleando, tras el éxito del Britannia, para construir el largo puente ferroviario de Victoria, sobre el río St. Lawrence en Canadá. La labor de Roebling para superar la preponderante falta de confianza hacia los puentes colgantes para el ferrocarril no resultó tarea sencilla.

Desde un principio, Roebling mostró una clarividente preferencia por los cables frente a las cadenas que se venían usando en muchos puentes colgantes, y ya en 1841 había patentado el sistema que empleó en el Niágara para materializar los 4 cables principales, cada uno con 3.640 alambres de hierro forjado fabricados por su propia compañía,



Sistema de cables: Seguin, americano y Arnodin.

(pag. derecha) Grabado del Puente sobre el Niágara y detalles de la sección transversal y de la celosía del tablero.

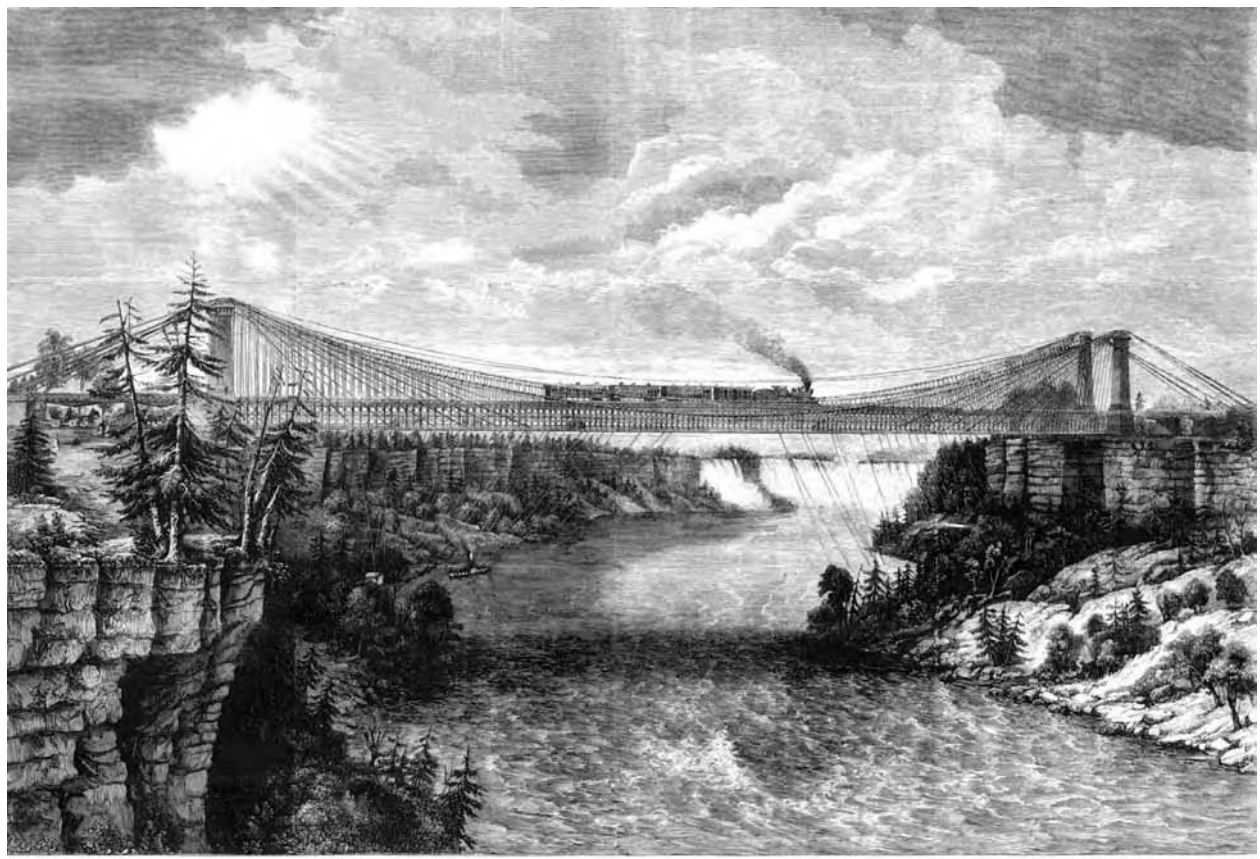
en los que los tendones no iban simplemente en paralelo, sino que se agrupaban en cilindros continuos de 250 mm de diámetro en torno a los que Roebling dispuso más cable que los rodeaba compactándolos y protegiéndolos de la corrosión, en una solución que anticipaba varios de los procedimientos actuales. También en este puente se empleó por primera vez el sistema de devanado de los cables mediante una polea móvil, en otra muestra de cómo en muchos aspectos el del Niágara acercó a los puentes colgantes a su madurez.

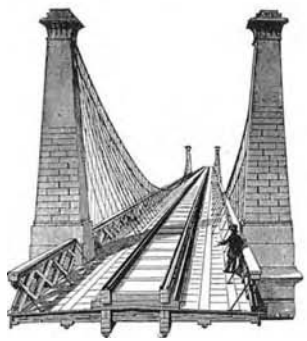
Aunque la motivación principal del puente era dar paso al ferrocarril, también habría de soportar el paso de una carretera, lo que Roebling, consciente ya de la importancia del tablero para mitigar deformaciones y vibraciones, solucionó con una estructura de gran canto que proporcionaba dos niveles para sendos usos. Esta configuración dotó al tablero de la decisiva rigidez que habría de resultar imprescindible ante el paso de las locomotoras, lo que en este caso se aseguró con potentes celosías de madera y hierro conformando la doble plataforma. Para reforzar la rigidez del conjunto ante el paso del tren, Roebling añadió además 64 cables de atirantamiento desde las torres a las partes laterales del tablero, que se añadían a las péndolas verticales del sistema de cuelgue. Cuando, durante la construcción del puente del Niágara, el aclamado puente de Wheeling, construido por Ellet cinco años antes y que había sido el primero en superar los 1.000 pies (305 metros), se vino abajo ante la fuerza del viento, Roebling no dudó en ordenar que al puente del Niágara se le añadiesen nuevos tirantes, esta vez anclados al propio terreno, que evitasen cualquier tipo de oscilación transversal como las que se habían observado en el puente de Wheeling antes de su colapso. La visión de estos pocos ordenados cables descendiendo hasta las laderas de la garganta en busca de anclaje recuerda el inevitable carácter experimental de esta gran obra que se situaba tan lejos de cualquier precedente.

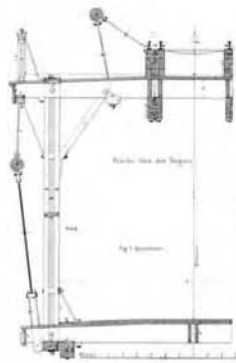
"Sin vibraciones de ningún tipo" [2], fue la escueta frase que anotó Roebling en su cuaderno de obra cuando en 1855, cuatro años después del inicio de las obras, la primera locomotora cruzó el puente. Pocos meses después docenas de trenes cruzaban a diario un puente que fue el asombro del mundo, sólo cinco años después de que el justificadamente aclamado puente de Britannia hubiese establecido un gran récord de luz para el ferrocarril que el puente de Roebling casi doblaba.

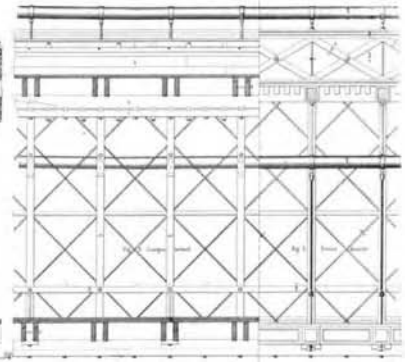
En su descripción del puente publicada en Gran Bretaña, Roebling no dudó en afirmar que el mismo puente, construido en Europa, hubiese costado más de 10 veces más, observación que parece exagerada pero que no ésta injustificada si se compara el presupuesto final de 80.000 libras del puente del Niágara con la inversión que había sido necesaria poco antes para la construcción del Britannia ponderada por su longitud. En efecto, las circunstancias durante la construcción del gran puente de Britannia en la

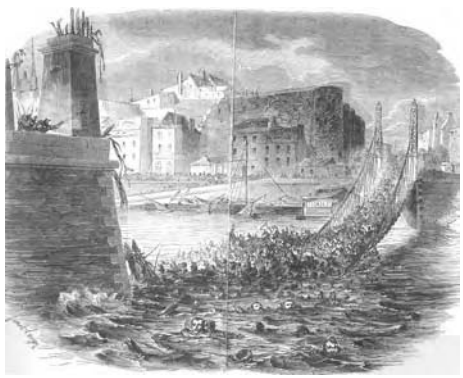
[2] W.D. Middleton. Landmarks on the Iron Road.











El desastre del puente colgante de la Basse-Chaîne.

Puente de Brooklyn sobre el río Hudson (Nueva York, 1869-1883). Inicialmente soportaba dos vías de ferrocarril ligero.

(pag. derecha) Point Bridge (Pittsburg, 1876).

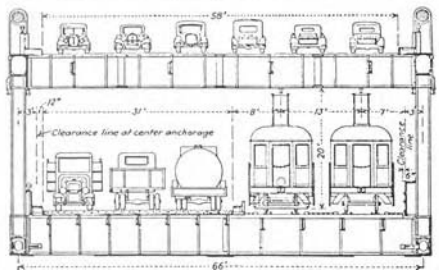
Vista y sección del puente del West Bay Crossing (San Francisco, 1932).

Grabado de la sección transversal del puente de Williamsburg sobre el East River (Nueva York, 1896-1903).

pudiente Gran Bretaña estaban lejos de las que imperaban al otro lado del Atlántico donde, en palabras del propio Roebling, *"la tarea del ingeniero es sacar lo máximo de lo mínimo"*. El mismo Stephenson llegó a afirmar que si el puente de Roebling era correcto, entonces el suyo era una equivocación, aunque una visión con la perspectiva de casi un siglo y medio desmiente la humildad de Stephenson, cuyo robusto puente de Britannia en cajón continuo se adelantó a su tiempo y mostró el camino hacia la que es hoy la más propia tipología del ferrocarril.

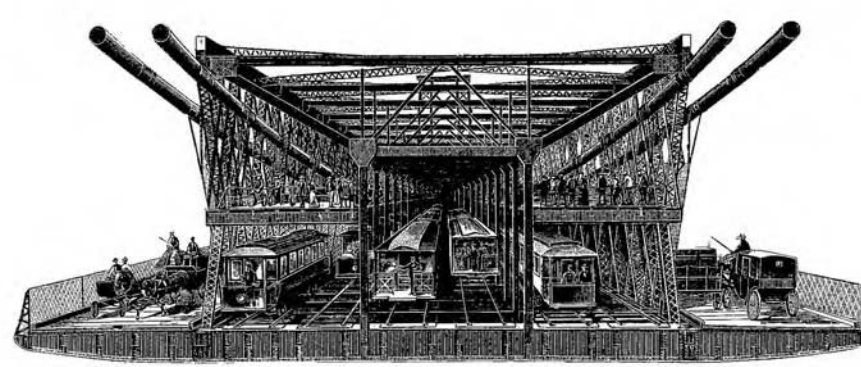
Aunque con una velocidad estrictamente limitada a 5 km/h, el puente de Roebling soportó durante 20 años todo el tráfico ferroviario a través del Niágara, hasta que el aumento del peso de los trenes acabó mostrando sus limitaciones. En el 77 se reforzaron los anclajes de los cables, y en el 79 la celosía de madera se reemplazó por completo por una de hierro. Una década más tarde el peso de los trenes triplicada el considerado en el diseño, y el tráfico era tal que resultaba imprescindible contar con una puente de doble vía, por lo que se optó por construir un puente arco, tras cuya finalización en 1897 el viejo puente colgante, patrimonio de la ingeniería y memoria viva de la determinación y capacidad de superación de uno de los santos de la profesión, fue derribado.

Pese a su éxito, en el momento de su derribo el del Niágara era todavía era el único puente colgante específicamente destinado para el ferrocarril, e incluso entonces, cuando el siglo tocaba a su fin, se mantenía en Europa el paréntesis de desconfianza en los puentes colgantes que había seguido a una serie de fracasos y colapsos de la tipología a mediados de siglo. Sirven de ejemplo el puente de Los Inválidos de Navier en París, que tuvo que ser demolido por problemas en sus anclajes, o el colapso, en una noche de tempestad de 1850, del puente de Basse-Chaine bajo el paso rítmico de una compañía militar entre cuyos miembros 200 perdieron la vida. La alarma social que produjeron estos hechos trasladó el ímpetu ingenieril con la naciente tipología a los Estados Unidos, donde una generación de ingenieros emigrantes de formación europea y encabezados por el propio Roebling, dio frutos extraordinarios. Los diversos puentes construidos en la época, siguiendo la estela del puente del Niágara, constituyeron etapas de una evolución que condujo en 1883 al puente de Brooklyn sobre el río Hudson, en Nueva York, obra con la que culminó la vida de John Roebling y que probablemente sea, con el permiso del Firth of Forth, el mayor y más conocido logro en la construcción de puentes del siglo XIX, e incluso de todos los tiempos. Los cerca de 500 metros de su luz suponen un auténtico hito en la historia de la ingeniería estructural. Su concepción y los métodos para su construcción serían una decisiva guía para los grandes puentes colgantes americanos que se construyeron ya en el siglo XX.



Entre los numerosos y notables puentes colgantes que siguieron al del Niágara, no hubo sin embargo obras específicamente ferroviarias, pues aunque la problemática que las había proscrito se había demostrado salvable, no dejo de reducir la eficiencia y competitividad de la tipología frente a las recientemente consolidadas celosías metálicas tan ligadas al tren, y que fueron como hemos visto las más empleadas para permitirle volar sobre los grandes cauces. Por supuesto, y aunque el protagonismo en los grandes puentes colgantes ha sido para la carretera, varios de ellos, generalmente en entornos urbanos, no dejaron de dar paso entre sus numerosas calzadas a los raíles del metro o el ferrocarril, habitualmente ligero. Fue éste el caso del propio puente de Brooklyn, o de muchos otros como los de Williamsburg y Manhattan de 1903 y 1912, también en Nueva York, o de el Point Bridge de 1876 en Pittsburg. Muchas de las vías que originalmente soportaban estos puentes han sido sin embargo sustituidas por más carriles de autopista conforme el tráfico automovilístico fue creciendo a lo largo del siglo XX desplazando con frecuencia a los trenes del siglo anterior.

El paso del ferrocarril a través de los grandes puentes colgantes, que monopolizan las muy grandes luces, puede intuirse por la incrementada rigidez de sus tableros, por los que los trenes viajan casi sin excepción dentro de particularmente potentes celosías metálicas si se comparan con las de los puentes que sólo dan paso a la carretera. El puente del Tajo en Portugal, el de Matadi en el Congo, o el de Rainbow y los del sistema Honshu-Shikoku en Japón son sólo algunos de los destacables ejemplos modernos



Puente de Paillat o de La Cassagne, en los Pirineos orientales (1908-1909).

alrededor del mundo, entre los que hoy ostenta el récord de luz para un puente que da paso al ferrocarril, además de a la carretera, el puente de Tsing Ma en Hong Kong, que salva una luz de 1.377 metros y en el que se ha sustituido ya la celosía metálica por un gran cajón por cuyo interior discurren los trenes.

Fuera de las muy grandes luces, y volviendo al siglo XIX, deben recordarse por último las figuras francesas del ingeniero Gisclard y el constructor Arnodín, cuyas obras en la frontera del cambio de siglo suponen probablemente el más destacable retorno al empleo de las estructuras colgantes específicamente para el ferrocarril tras el Niágara. En 1899 desarrollaron una configuración para los cables que buscaba lograr la máxima rigidez y que de hecho se encuentra ya a medio camino entre los puentes colgantes y los modernos y más rígidos puentes atirantados, a los que se adelantaron casi medio siglo. En lugar de un cable principal de suspensión, Gisclard empleaba dos familias de cables solapados y que discurrían, tras cruzarse con la otra familia en el centro del puente, horizontales junto al tablero, de manera que se conseguía un efecto similar al de un atirantamiento, pero sin introducir esfuerzos axiles en el tablero. La más conocida de sus obras es la del puente de Cassagne, de 1909, que demostró con otras varias la eficacia del sistema, aunque por su complejidad constructiva no ha tenido continuidad más allá del propio Gisclard.

Con estas magníficas obras toca a su fin un periplo por el ferroviario siglo XIX, con esporádicos saltos a su futuro o su pasado que, recorrido de la mano de los puentes del tren, supone una reivindicación para el adjetivo "decimonónico", tantas veces empleado como sinónimo de obsoleto, pero que referido a los puentes para el ferrocarril aún hoy puede encerrar, en muchos casos, connotaciones de progreso y modernidad entendidos en su más amplio sentido. Cualidades que se reflejan en tantos espléndidos logros centenarios que han abierto senderos para la ingeniería que todavía hoy recorremos (la mayoría de los métodos constructivos actuales se siguen basando en los desarrollados en el siglo XIX) y que en no pocos casos aún sirven a la sociedad en forma de osados pasos, sobre obstáculos por mucho tiempo considerados insalvables. Obras éstas cuyo mérito y valor puede acrecentarse más si cabe al recordar que se llevaron a cabo en una época en la que, fuera del ferrocarril, el transporte terrestre se basaba todavía en el tiro animal. Esta situación, sin embargo, habría de cambiar y con su fin se iniciaba también el de la era dorada del tren.

Puente de Tsing Ma (Hong Kong, 1997).

Puente colgante en el sistema Honshu-Shikoku (Japón, 1988).

Vista general del puente de La Cassagne.

3. Siglo XX. La edad de oro del hormigón

3.1 Introducción

La expansión de la red ferroviaria alcanzó su cenit en el último tercio del siglo XIX, el siglo del tren. Antes de que la centuria acabase, sin embargo, los motores de combustión interna de Karl Benz y Gottlieb Daimler ya se encontraban avanzados en Alemania, y en 1908 Henry Ford inició en Illinois la producción en cadena de su Ford "T". La expansión del automóvil, tren liberado de sus raíles, fue en el primer tercio del siglo XX más rápida si cabe que la que, menos de un siglo antes, había vivido el ferrocarril. Si el XIX fue el siglo del tren y el carbón, el XX podría considerarse en cambio el siglo del coche y el petróleo. El automóvil desplazó a las carretas de sus caminos, las carreteras, y no tardaría en demandar los suyos propios, las autopistas, que proliferaron a partir de la Segunda Guerra Mundial. De ese modo se convirtió en el sucesor del tren como principal impulsor de la construcción de nuevos y mayores puentes, heredando para ello los grandes avances del siglo anterior.

El ferrocarril ya había desarrollado la mayor parte de su infraestructura y pasó a vivir de lo ya hecho, en una época marcada por las tremendas necesidades de mantenimiento de tantas líneas creadas aceleradamente durante la euforia constructora de la expansión de la red. Los problemas financieros empezaron a acuciar a muchas de las compañías ferroviarias, en un contexto que enmarcó el paso de las compañías privadas a un ferrocarril estatalizado, de indudable valor social y estratégico, pero de rentabilidad muy comprometida por los requerimientos de conservación de una infraestructura ya antigua sobre la que el tren cada vez menos podía competir con los nuevos modos de transporte.

Cadena de montaje del Ford "T" en Detroit, a principios del siglo XX.

Ello puso a su vez fin definitivo a la figura del ingeniero de empresa ligado a alguna de las diferentes compañías privadas del ferrocarril y que estaba a cargo de casi todo lo relacionado con sus nuevas líneas, y en particular de sus puentes. Gradualmente se fue pasando al actual sistema, en el que por lo general las grandes obras dependen directa o indirectamente de la Administración y sus proyectos son objeto de concursos. Se pierde así, en lo que se refiere a los puentes del tren, la idea del ingeniero ferroviario, cuya figura se difumina, perfilándose en su sustitución la del ingeniero de puentes.

Las nuevas líneas eran muy escasas, y las antiguas, aunque desarrolladas con criterios de trazado revolucionarios en su época, se convirtieron en un freno para las velocidades de explotación de los trenes que, incluso ahora, no superan en la mayoría de ellas los 100 km/h. En estas condiciones el tren perdió competitividad frente al automóvil y no son pocas las líneas que a lo largo del siglo XX se fueron cerrando. Así pues, si

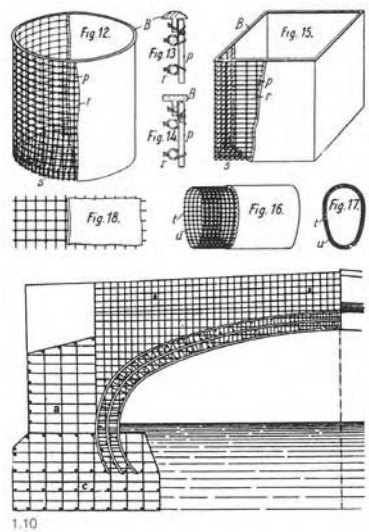
Hormigonera de finales del siglo XIX.

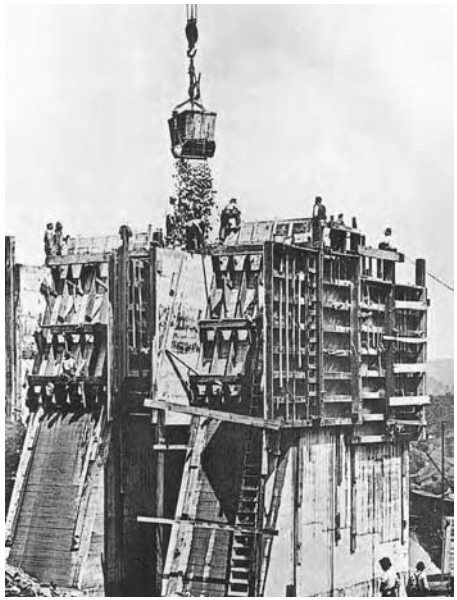
durante el siglo XIX hablar de los obstáculos salvados por el tren era lo mismo que hablar de la vanguardia en la construcción de puentes, de continuos records de luz y de la amplia mayoría de las grandes realizaciones e innovaciones tecnológicas, con el cambio de siglo ese lugar pasó progresivamente a estar ocupado por el coche, que protagonizaría los más importantes proyectos. La mayoría de las principales obras a lo largo del siglo XX escaparán por tanto de nuestro ámbito, el de los puentes del tren, que con sus mucho mayores cargas y una red ya consolidada, pasaría a un segundo plano hasta que el desarrollo de la alta velocidad iniciado en el último tercio del siglo le ha devuelto el papel principal que actualmente ocupa en la construcción de puentes.

No por ello, por supuesto, ha dejado el ferrocarril de ofrecer a la largo de todo el siglo XX innumerables realizaciones del máximo interés, pues aunque el número de líneas principales de nueva construcción se redujo marcadamente, a las pocas obras de éstas se sumarían, en cambio, incontables proyectos de reconstrucción o sustitución de puentes, numerosas líneas secundarias o de vía estrecha, importantes proyectos de mejora de trazados existentes, así como múltiples desarrollos para los ferrocarriles urbanos en forma de tranvía, primero, y metro, después. Así, el ferrocarril, en su tránsito gris y sufrido desde principios del siglo XX hasta la llegada de la alta velocidad, ha seguido emergiendo esporádicamente para legarnos obras que como los viaductos de Plougastel o Martín Gil se situaron en la vanguardia de la construcción de puentes y hoy son patrimonio de la ingeniería. Estas y otras muchas realizaciones igualmente notables protagonizarán el itinerario que a lo largo del presente capítulo habrá de llevarnos hasta los puentes del rico presente ferroviario espoleado por la alta velocidad.

En dicho itinerario, el hormigón, que nacía en el ocaso de la era del tren, fue rápidamente ganando protagonismo y hoy monopoliza junto con el acero la construcción de puentes. El hormigón es un conglomerado resistente de arena y grava unidos en una matriz cementosa. El cemento se endurece al reaccionar químicamente con el agua, pero antes la mezcla dosificada de materiales conforma una masa fluida que puede ser moldeada para generar virtualmente cualquier forma. Desde la consolidación del hormigón a principios del siglo XX, no existe prácticamente ningún puente que no cuente con su tan gris como imprescindible presencia, si no en tablero o pilas, sí en cualquier caso en cimientos o estribos.

El uso de cementos primitivos se remonta al tiempo de los romanos, aunque su empleo en la era moderna debería esperar al s. XIX, en el que Joseph Aspdin, albañil de Leeds, dio el primer gran paso al idear un método para fabricar cemento de forma artificial tras experimentos horneando piedra caliza y arcillas en su cocina. Ya en 1824 patentó lo que hoy conocemos como cemento Portland, aunque este no era su nombre comercial, sino el que popularmente se le asignó por la semejanza del producto final con la





Esquemas de las patentes de Monier.

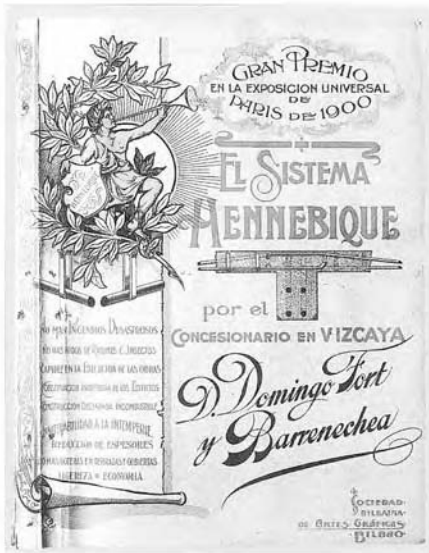
Hormigonado de una de las pilas del viaducto ferroviario de Tunkhannock a principios del siglo XX.

piedra caliza de Portland, en la costa de Dorset. Hacia 1840 el cemento se producía en cantidades ya significativas en Inglaterra, Francia y Alemania, y de hecho Stephenson, Eads o Roebling, por ejemplo, lo emplearon en sus cimentaciones de los ya comentados puentes de High Level, Saint Louis o Brookling. En Francia, François Coignet fue uno de los pioneros del hormigón al iniciarse la segunda mitad del siglo XIX y, por ejemplo, el primero en empezar a determinar el efecto debilitador de un excesivo contenido de agua en la dosificación de la mezcla.

Sin embargo, el verdadero potencial del hormigón habría de llegar de su asociación con el acero. El hormigón, piedra artificial, ofrece resistencia a compresión, pero es sin embargo débil y frágil frente a la tracción. En la esencia del hormigón armado está el reforzar interiormente al hormigón con barras de acero para dar lugar a un material compuesto en el que el hormigón puede resistir la compresión y son en cambio las armaduras interiores de acero las que, cuando el hormigón se fisura, resisten la tracción. Capacidad de resistir tracción y compresión que es, en definitiva, capacidad para resistir flexiones, esfuerzo protagonista al puentear obstáculos y que el arco sólo permitía esquivar para luces limitadas. Al hermanarse con el hormigón, el acero habría de llevarlo desde ocultos cimientos y pequeñas pilas o bóvedas, hasta los grandes arcos y vigas de muchos de los puentes más importantes del mundo.

La verdadera revolución en el empleo del hormigón está, por tanto, íntimamente ligada al concepto del hormigón armado, que numerosos ingenieros llegaron a explorar, incluido el mismo Telford, pero cuyo crédito suele atribuirse a un atípico jardinero e inventor francés, Joseph Monier, que ante la frecuente rotura de sus frágiles maceteros de hormigón en masa empezó a intuir el papel beneficioso que una malla metálica en el interior del hormigón podría desempeñar. Su primera patente para macetas y otros elementos de hormigón armado es de 1867, aunque no tardó en percatarse del potencial de su idea para las grandes construcciones y nuevas patentes para diversos elementos constructivos, incluyendo pequeños puentes, la siguieron. Con estos modelos Monier construiría en 1875 la pasarela de Chazelet, que con sus 16.5 metros de luz fue el primer paso de hormigón armado en el mundo. La distribución de la armadura en los modelos para puentes de sus patentes revela, sin embargo, que apenas empezaba a comprender el flujo de fuerzas en el hormigón armado.

Pero si curioso es que el hormigón armado diese sus primeros pasos en Europa de la mano de un jardinero, no lo es menos que en Estados Unidos fuese un abogado, Thaddeus Hyatt, quien más experimentase y profundizase en su conocimiento. Su publicación de 1877 mostraba una comprensión del nuevo material y una base científica y experimental muy superiores a las de Monier. Hyatt fue el primero en abogar por las vigas en "T" como forma estructuralmente más efectiva y en proponer al hormi-



Panel comercial del sistema Hennebique.
Portada de la revista "Le Béton Armé" en 1900

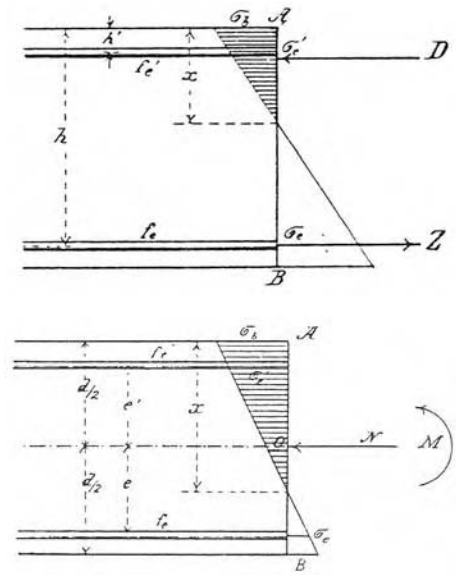
gón armado como firme alternativa para la construcción de puentes. Algunos de los detalles que desarrolló se adelantaron varias décadas a su tiempo, pero pese a éstas y otras valiosas aportaciones al otro lado del Atlántico, el desarrollo inicial del hormigón armado fue fundamentalmente europeo.

A la progresiva consolidación del hormigón contribuyeron en Alemania y de forma decisiva Mathias Koenen y Gustaf Wayss, comprador de la patente de Monier para el país germano, y patrono de la empresa constructora Wayss & Freytag A.G., que jugó un papel protagonista en las primeras construcciones con hormigón. La publicación de Wayss y Koenen en 1887 sobre el sistema Monier y su aplicación a la construcción fue clave en la diseminación del conocimiento de este novedoso material. Sin embargo, el principal impulsor de la construcción con hormigón armado habría de ser el francés François Hennebique, cuyos trabajos con vigas en "T" se tradujeron en varias patentes a partir de 1892. En ellas se incorporaban detalles que serían un referente durante muchos años, como los cercos en las vigas o la armadura longitudinal inferior inclinada hacia la cabeza al llegar a los apoyos para mejorar la resistencia al cortante.

Hennebique percibió desde un principio las ventajas del monolitismo entre los diferentes elementos de una estructura, potente cualidad estructural que nacía con el hormigón y a la que pocas veces está justificado renunciar. Pero quizás lo que diferenció a Hennebique de sus contemporáneos alemanes no fue el conocimiento técnico del hormigón armado que alcanzó, que posiblemente fuese inferior, sino su visionaria capacidad empresarial y comercial, que le llevó a establecer toda una red europea de franquicias para la introducción de sus sistemas constructivos que habría de liderar la construcción con hormigón en el primer cuarto del siglo XX.

Pese a la resistencia de los ingenieros más conservadores de la administración, la mayor economía para luces cortas de las estructuras de hormigón en relación con las de acero o piedra hacía imparable su desarrollo. Entrado el siglo XX los modelos de Hennebique se habían empleado ya para construir miles de estructuras y más de un centenar de puentes, aunque en los inicios del hormigón armado, este todavía poco experimentado material tendía a descartarse para el pesado y exigente ferrocarril.

Otra decisiva contribución para la consolidación del hormigón es la del ingeniero suizo Emil Mörsch, discípulo de Ritter en la prestigiosa escuela de Zurich que tantas y tan grandes aportaciones al desarrollo de las estructuras ha acunado. En 1901 recaló como ingeniero jefe en la ya mencionada constructora alemana Wayss & Freytag. Mörsch realizó varias obras sin duda destacables pero quizás todavía mayor fue su aportación a la teoría del hormigón armado, que se plasmó en su publicación de 1902 *Der Betoneisenbau, seine Anwendung und Theorie* (Hormigón armado, aplicación y teoría). En ella recogía



Figuras del libro de Emil Mörsch: "Reinforced Concrete Construction. Theory and Practice", 1902, que podrían formar parte de cualquier libro actual.

métodos de cálculo elástico para determinar los esfuerzos seccionales, basando el diseño en limitaciones tensionales para cargas en servicio, concepto hoy abandonado pero que entonces aseguró un adecuado margen de seguridad y un cierto control de la fisuración[1]. Su mayor aportación, sin embargo, fue el desarrollo de modelos en celosía para el análisis del hormigón armado, que facilitaban el diseño de los detalles de armadura y proporcionaron a los ingenieros una herramienta clara e intuitiva para entender y visualizar el comportamiento estructural del novedoso material. La que hoy se conoce como analogía de Ritter-Mörsch es todavía una potente herramienta de cálculo y ha sido la base de los imprescindibles métodos de bielas y tirantes.

La primera patente de Monier data en realidad del mismo año en que Siemens y Martins desarrollaron el horno de reverberación que habría de permitir la producción eficaz y asequible de acero. Sin embargo, los ingenieros tardaron bastante más en percibir el potencial del hormigón armado y su uso en superestructuras de puentes no dejaría de ser excepcional hasta prácticamente finalizado el siglo, más tarde incluso en el caso de los puentes de ferrocarril. Empezaban por entonces ya a asentarse, en base a la experimentación que se iba llevando a cabo, conocimientos que están en la esencia del hormigón armado. Así, se comprobó que el hormigón que rodea a las barras de acero supone una eficaz protección frente a su corrosión, y se empezó a comprender el papel fundamental que jugaba la adherencia entre ambos materiales para el funcionamiento del hormigón armado. Se pasó consecuentemente de las barras inicialmente lisas a las barras corrugadas usadas hoy y con cuya mejora de la adherencia pasaría a lograrse un mayor control de la fisuración.

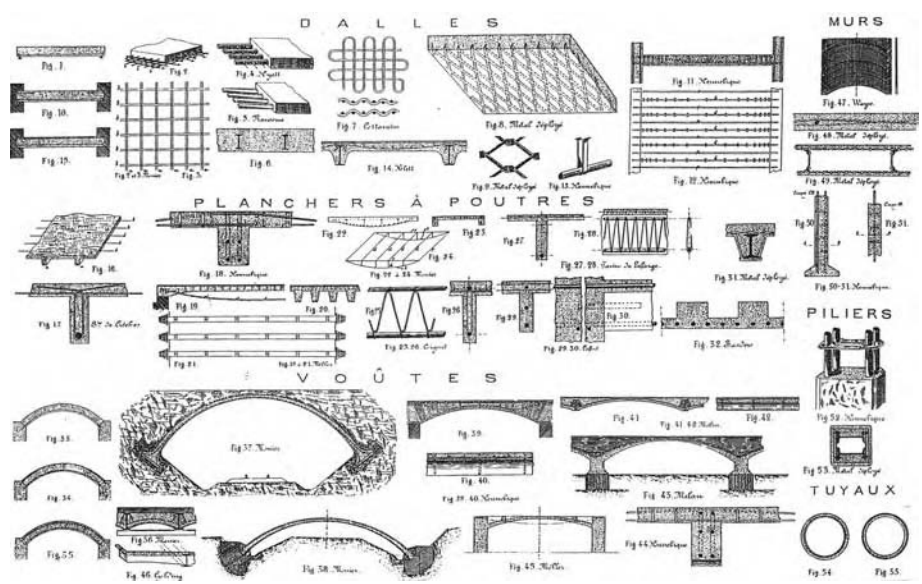
Fue también muy conocida la prueba de la resistencia al fuego del hormigón que Hyatt realizaría en un edificio de Londres, construido a tal efecto. Se entendió al tiempo la decisiva importancia, en un principio inadvertida, de que tan diferentes materiales tuviesen similares coeficientes de dilatación térmica, lo que permite que su colaboración adherente no se vea comprometida por los cambios de temperatura. También las dosificaciones en las mezclas se fueron mejorando y normalizando, a la vez que avanzaba la calidad de los cementos. En los años 30 la compacidad del hormigón se vio asimismo muy mejorada cuando se empezó a vibrar el hormigón fresco, práctica cuya importancia quedo rápida mente patente y no tardó en imponerse. La comprensión del nuevo material y sus técnicas, en definitiva, avanzaban firmes, y conforme lo hacían fueron calando en los ingenieros de puentes las importantes ventajas que el hormigón podía ofrecer frente al acero [2].

[1] La primera norma suiza de 1903 establecía como límites para las tensiones en servicio: 4.5 MPa en el hormigón en fibra extrema. 3.5 MPa en el hormigón en cdg y 120 MPa para la armadura.

[2] Aunque un fundamentado conocimiento de fenómenos más complejos como son la retracción o la fluencia del hormigón no se asentaría, como veremos, hasta mediados de siglo.

En efecto, la resistencia, ligereza y velocidad de construcción de los puentes metálicos tenían como contrapartida un rápido y con frecuencia severo deterioro del material. Este se debía fundamentalmente a la corrosión, pero en el caso del ferrocarril también al daño producido por la entonces poco conocida fatiga. Los costes de mantenimiento encarecieron mucho la explotación de las líneas, y más aún lo haría la frecuente sustitución de muchos puentes metálicos que fueron quedando obsoletos ante el progresivo aumento del peso de los trenes. La alta relación entre la sobrecarga y la carga permanente en los puentes metálicos, que habla bien de su eficiencia estructural, los hace por otro lado muy sensibles al aumento de las cargas actuantes, lo que inevitablemente es un problema cuando éstas se deben a locomotoras que en 1860 pesaban 40 toneladas, en 1890 ya superaban las 100 y en 1905 alcanzaban por vez primera las 160 toneladas, cuadruplicando los pesos que tenían menos de medio siglo antes. Las estructuras metálicas, además, resultaban más problemáticas de cara al proceso de electrificación de las líneas que por entonces era ya intenso.

Frente a estos inconvenientes, el hormigón parecía ofrecer las conocidas ventajas de la piedra pero de forma mucho más económica y constructiva, y no tardaría, por tanto, en empezar a considerarse como una alternativa válida para la construcción de puentes de ferrocarril. Para ello, la "piedra artificial" tendió inevitablemente a usarse en un principio de forma análoga a como se venía usando la piedra natural y así, con el cambio de siglo, nacieron los primeros arcos de hormigón para el tren.



Panel con las patentes del sistema de Hennebique del hormigón armado.

3.2 Arcos de hormigón

Viaducto de Glenfinnan (línea Fort William-Mallaig, 1898). Viaducto sobre el río Matarraña (línea Tarragona-Zaragoza). Viaducto entre Redondela y Os Valos (línea Monforte-Vigo).

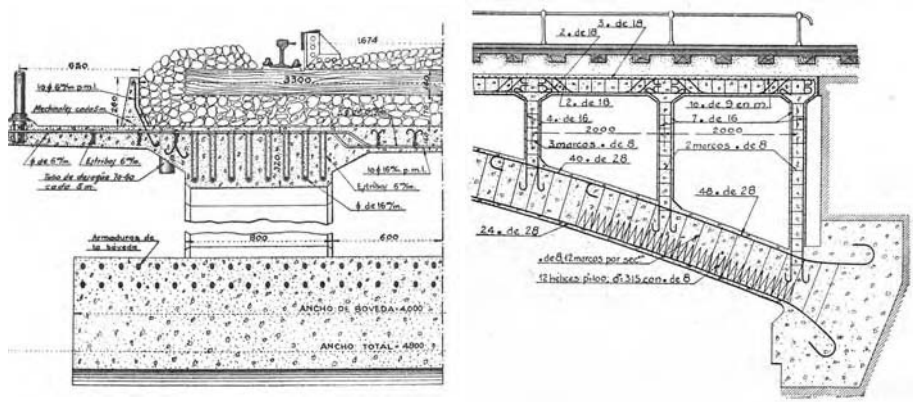
[1] En España, tras la Guerra Civil, hubo gran escasez de acero y por eso se retornó en no pocas ocasiones a los arcos de hormigón en masa o muy poco armados, "puentes anacrónicos", como los llamaba Carlos Fernández Casado.

La línea entre Fort William y Mallaig fue el último gran proyecto ferroviario de las Islas Británicas y el primero en el que se empleó el hormigón en la superestructura de puentes para el tren. Robert McAlpine, al que acabaría conociéndose como "Concrete Bob", acostumbrado al trabajo con hormigón en cimientos y pilastras, fue el primer gran defensor en Gran Bretaña de su uso a gran escala en puentes, y la baja calidad de la piedra local le brindaría en este proyecto su gran oportunidad. McAlpine mostró la capacidad del hormigón en numerosos puentes y túneles de la línea, entre los que destaca el conocido viaducto de Glenfinnan de 1898, que con sus 21 arcos de 15 metros es posiblemente la primera gran realización en hormigón para el ferrocarril. Característico por coincidir con una pronunciada curva, este viaducto ha eclipsado la otra gran obra de la línea, el puente sobre el arroyo de Borrodale, en el que McAlpine, para evitar cimentar sobre el cauce, construyó un arco de 55 metros que se convirtió en su momento en el mayor arco de hormigón del mundo y fue un impulso importante para el empleo de este material. Si en los cinco años previos a este viaducto sólo 3 puentes significativos se habían construido en hormigón, los 3 en Alemania y para carretera, en los once años que le siguieron se construirían en todo el mundo más de 50, en una espiral de uso creciente del nuevo material que ya no encontraría freno.

Estos primeros puentes de hormigón para el ferrocarril fueron de hormigón en masa, y por lo tanto debían necesariamente trabajar a compresión en idénticas configuraciones en arco a las de los puentes de piedra, pero incluso cuando rápidamente se pasó a armar el hormigón, los ingenieros tardaron un tiempo considerable en liberarse de la premisa de hacer los puentes de hormigón como si se tratase de arcos de piedra. Era de hecho frecuente revestirlos de este material o incluso dar forma al hormigón en los paramentos para simular sillares. Son ejemplos de ello algunos de los primeros puentes españoles de hormigón, como el puente sobre el río Matarraña en la línea Zaragoza-Tarragona o el situado entre Redondela y Os Valos en la línea Monforte-Vigo[1].

Uno de los primeros saltos cualitativos que empezó a aprovechar las cualidades del nuevo material llegaría de la mano de uno de los pioneros del hormigón armado, François Hennebique, que aunque construyó sobre todo edificios y puentes de carretera, nos dejó ya en 1909 el revolucionario puente de La Mescla sobre el río Var para el ferrocarril ligero. Se trata de un puente arco con tablero intermedio que es pionero al introducir tirantes de hormigón armado y alcanzó la asombrosa luz de 60 metros. Hoy se mantiene en uso como puente de carretera.

[2] De esta época es también, por ejemplo, el magnífico viaducto de piedra de Landwasser, del que ya hemos hablado.



(derecha) Sección transversal y longitudinal de un arco de hormigón armado español de principios del siglo XX.

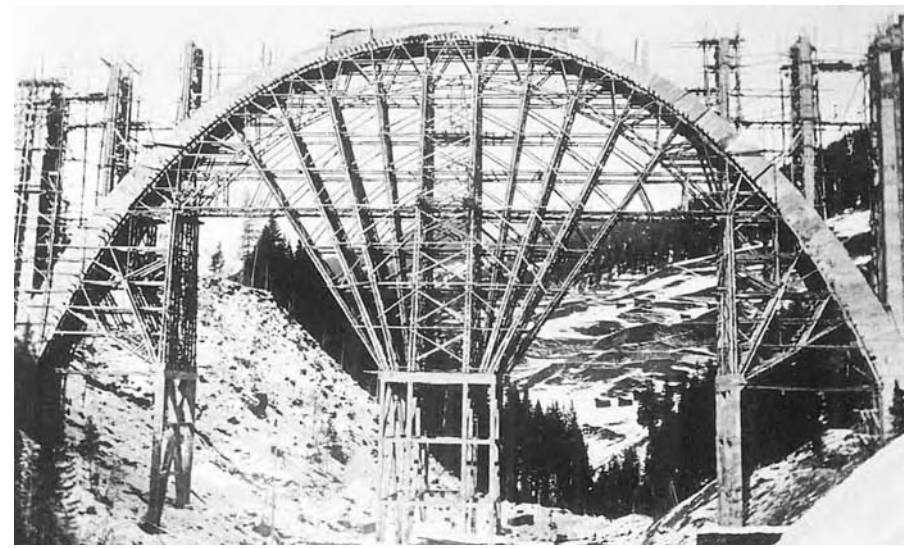
Puente de hormigón con tablero inferior sobre el Ródano en Suiza (1906).

Viaducto de Langwieser (1912-1914)

En los mismos años se construyó otro puente similar en Suiza, sobre el Ródano, con una luz de 59 metros. Los ferrocarriles suizos habrían de ofrecer varias de las más notables obras de este periodo, pues diversas líneas importantes a través de los Alpes, sobre cuya dificultad no es necesario incluir comentarios, se completaron en el primer tercio del siglo XX. Aunque esto más que causa, es circunstancia. Las causas de obras tan sobresalientes como las que verían la luz en Suiza en las siguientes décadas, habría que buscarlas más bien en la excelencia en ingeniería que, desde Culmann, se venía gestando en Suiza con epicentro en el Politécnico de Zurich. No menos importante es la especial sensibilidad por el cuidado del entorno de la que tradicionalmente ha hecho gala el país helvético, y que sin duda se plasmó en el sencillo atractivo y limpieza visual de muchas de sus obras [2].

Fue, así pues, en Suiza donde nació la que es posiblemente la primera gran obra de hormigón armado para el ferrocarril. El viaducto de Langwieser, construido en 1914 en la línea Chur-Arosa, fue el primer puente de hormigón para el ferrocarril que alcanzó los 100 metros, y lo hizo además con una configuración que poco difiere de la de muchos puentes actuales, en una muestra temprana de la madurez que iba alcanzando la construcción con hormigón armado. Su poco rebajado arco está formado por dos cuchillos, solidarizados por montantes horizontales, sobre los que apoya mediante esbeltas pilas verticales el tablero, cuya longitud total alcanza los 288 metros. La tan magnífica como costosa cimbra de madera que se requirió para su construcción es muestra del que iba a ser uno de los mayores retos y condicionantes de este tipo de arcos: soportar el pesado hormigón mientras éste no es capaz de sostenerse a sí mismo.

Cimbra del viaducto de Langwieser en 1913.

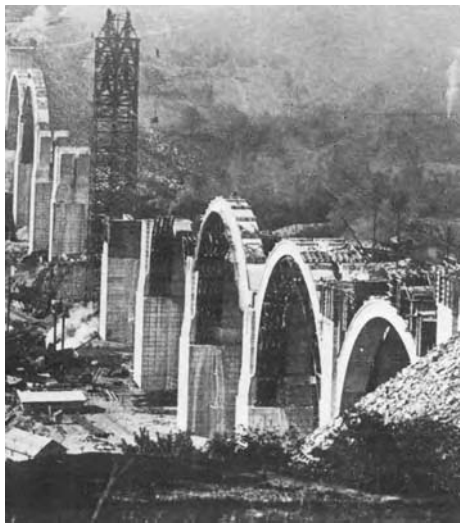


Pero de los primeros ejemplos de puentes ferroviarios de hormigón en las dos primeras décadas del s. XX, el mayor, que no el de más luz, es posiblemente el viaducto de Tunkhannock. Se construyó en Pennsylvania para el Western Railroad al mismo tiempo que en Suiza se levantaba el viaducto de Langwieser, aunque se acabó un año después, en 1915. Como el arco de Hell Gate o la gran celosía de Sciotoville, ambos ya descritos, es uno de los últimos ejemplos de la era monumental de los puentes americanos para el ferrocarril. Con sus 725 metros de longitud y 10 arcos de 55 metros hoy se mantiene como uno de los mayores viaductos en arcos de hormigón en el mundo.

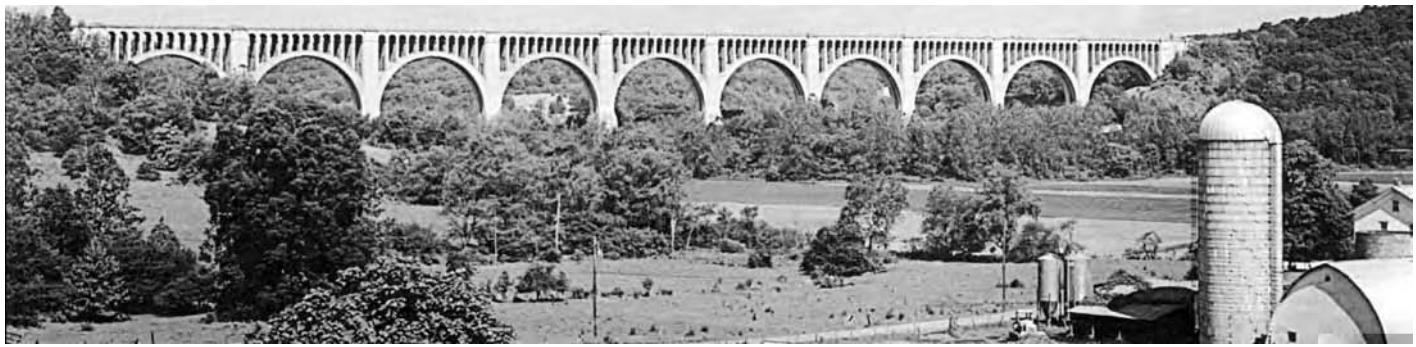
Esta gran obra formó parte de un programa generalizado de renovación de la línea de Delaware a Lackawanna, que incluyó la sustitución de muchas estructuras por los más durables y casi libres de mantenimiento puentes de hormigón, pero sobre todo llevó a significativos ajustes de trazado para mejorar la funcionalidad de la línea, en particular reduciendo las pendientes que en muchos casos exigían hasta 5 locomotoras para remontar las rampas con los vagones a plena carga. Fruto de esos ajustes es el cruce a casi 75 m sobre el valle de Tunkhannock, para el que se optó por el hormigón armado no por economía como en tantos otros casos (en los inicios del hormigón en Estados Unidos un puente de esta altura y longitud hubiese costado considerablemente menos de haber recurrido a una celosía de acero), sino sobre todo buscando la gran sensación de robustez y perdurabilidad que el hormigón podía ofrecer y que llevó nada menos que a publicitar la construcción en la prensa neoyorquina como la novena maravilla del mundo.

Dado el gran número de vanos y la considerable altura de los arcos sobre el terreno, en este caso se emplearon 5 cimbras en arco metálico triarticulado, que apoyaban sobre las propias pilas y se fueron reutilizando para construir sucesivamente los 20 arcos, dos por cada vano, del viaducto. La gran robustez de las pilas responde a esta construcción evolutiva que generaba empujes descompensados sobre ellas. Posiblemente, el reducir la altura del punto de aplicación de estos empujes sobre las pilas fue una de las causas para no elevar más los arcos principales, y en cambio hacer las 11 arcadas secundarias, que soportan el tablero sobre éstos, de una altura importante a la que de otro modo cuesta encontrar justificación. Uno de los aspectos más llamativos de la construcción fue el empleo, desde el mismo inicio de la obra, de todo un sistema provisional de cables para el transporte de las cubas de hormigón y el resto de materiales a lo largo de todo el viaducto. Para ello se construyeron dos torretas de madera de 50 m de altura en estribos y otra central de más de 90 metros, con un diseño que permitía la construcción del último arco que habría de atravesarla.

Viaducto de Tunkhannock (línea Delaware-Lackawanna, EE.UU. 1915). Proceso de construcción y vista general.



Una ingeniosa y efectiva manera de evitar las complicadas y costosas cimbras fue ideada ya en los primeros días del hormigón, a finales del siglo XIX, por el ingeniero austriaco Josef Melan, que inició su carrera en la Universidad de Viena como asistente del profesor Emil Winkler en la cátedra de "Ferrocarriles y construcción de puentes", cuyo doble ámbito este libro pretende ayudar a justificar. Con el sistema Melan los encofrados se colgaban de una estructura metálica, portante durante el hormigonado, que quedaba finalmente embebida como un refuerzo dentro del hormigón, con lo que con frecuencia se la llama también armadura rígida. Para su montaje se podían utilizar sencillos apoyos provisionales, aunque lo más frecuente era montar esta armadura rígida, pero ligera, mediante atirantamientos provisionales de forma análoga a como se venían construyendo muchos arcos metálicos, con lo que



se consigue prescindir por completo de cualquier cimbra o apoyo provisional. Este sistema se extendió rápidamente por Europa y Estados Unidos, sobre todo para los puentes en arco sobre cauces donde el empleo de cimbras es particularmente complicado y peligroso por el riesgo de crecidas. En particular en España, y de la mano de Eugenio Ribera, se generalizó este sistema que en los años 20 ya era uno de los más relevantes en los Modelos oficiales de puentes del Estado. Tras la Segunda Guerra Mundial la solución cayó en desuso, pero en los años 90 volvió a retomarse, sobre todo en los arcos más rebajados en los que baja la eficiencia del avance en voladizo atirantado, el más moderno y capaz método para la construcción de arcos de hormigón. Los actuales arcos mixtos de estructura metálica vista pueden, de hecho, entenderse también como construcciones herederas del sistema Melan en las que la armadura rígida ha salido al exterior.

Uno de los primeros y más conocidos usos de este sistema se dio en las obras de sustitución del viaducto de Grandfey, que como hemos expuesto había sido en 1862 de los primeros grandes viaductos en celosía que se construyeron y que 60 años después, aunque todavía en servicio, estaba deteriorado y próximo a la obsolescencia ante las mayores cargas de unas locomotoras en continua evolución. Desde principios de siglo la doble vía se había pasado por seguridad a vía única sobre el viaducto, con las consiguientes consecuencias negativas para la funcionalidad de la línea. En 1926 este viaducto se sustituyó finalmente por uno de hormigón sin apenas afectar al tráfico de la línea. El sistema Melan, concebido para los arcos, se extrapoló en este caso también a las pilas, que se levantaron empleando la propia estructura de las torres metálicas existentes para sujetar los encofrados, aprovechándolas a su vez como refuerzo interior. Esta fue una práctica habitual en los numerosos proyectos de sustitución de los decimonónicos viaductos metálicos por los más duraderos puentes de hormigón.

Viaducto de Grandfey, Suiza. Sustitución del antiguo viaducto metálico por uno multiarco de hormigón empleando el sistema Melan (1926).

El viaducto de Grandfey, de tipología similar al de Tunkhannok pero líneas más esbeltas revela como progresivamente, y con las obras suizas a la cabeza, se iba abandonando también en el ferrocarril la masividad de la mayoría de las primeras obras de hormigón armado, que mantenían claras reminiscencias de los arcos de piedra. Poco a poco los ingenieros fueron adaptando los puentes a las nuevas posibilidades del material, capaz, con sus armaduras, de resistir flexiones y de adoptar monolíticamente las formas estructural y visualmente más adecuadas. Uno de los principales artífices de este desarrollo, antiguo asistente de Hennebique y ex-alumno en Zurich de Ritter, había de hecho actuado como consultor en el proyecto de Grandfey. Robert Maillart haría suyas las posibilidades del hormigón armado como nunca antes lo había hecho nadie y muy pocos han logrado hacerlo después.

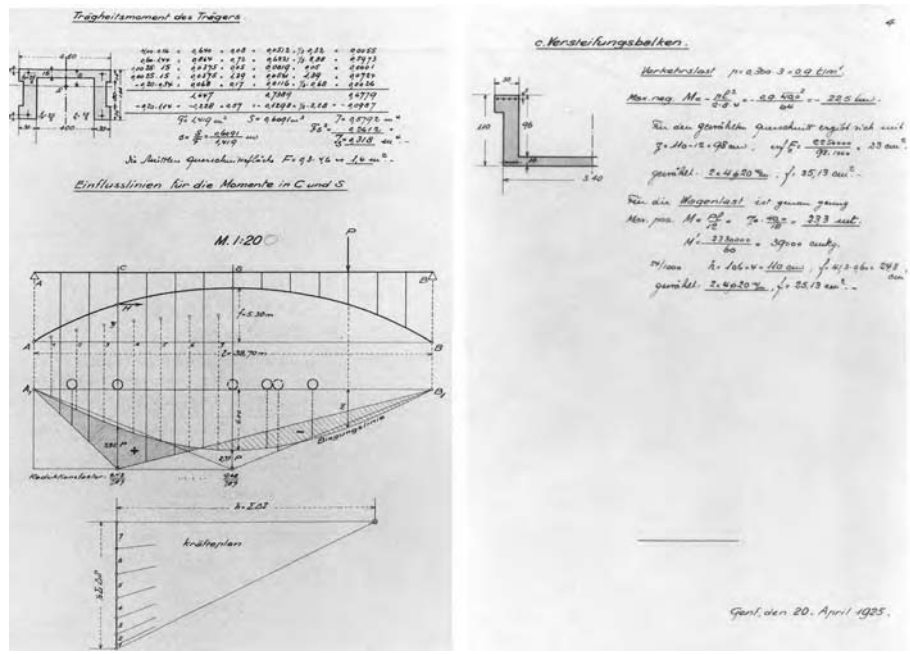
Vista general del nuevo viaducto de Grandfey.

Varias de sus obras en recónditos valles de los Alpes suizos no están entre las mayores pero sin duda sí entre las más grandes de la ingeniería de puentes. Su labor se concentró en la carretera, que acapara sus más conocidas realizaciones, pero también existen algunas notables para el tren. Particularmente destacable es el puente de Landquart, en la línea férrea de la Vereina a su paso por Klosters, excelente ejemplo llamado del arco sin rigidez, que Maillart llevó a su máxima expresión y no abunda en obras para el ferrocarril [3]. Construido en 1930, se trata de un arco laminar de 30 metros que se apoya en la rigidez del tablero para verse liberado de las flexiones. Puede, conceptualmente, entenderse como un puente colgante invertido, pues el arco laminar trabaja puramente a compresión de forma análoga a como el cable en suspensión lo hace a tracción, y es la rigidez del tablero la que en ambos casos hace frente a las flexiones que se derivan de cargas concentradas o no simétricas.

[3] Sin embargo, Leonhardt lo ha usado, como veremos, en otro magnífico puente en arco, esta vez de 1986 y para las líneas de Alta Velocidad alemanas.

El arco en este caso no está formado por una curva sino por una línea poligonal, con vértices en los puntos de apoyo de los montantes, que proporciona la curva antifunicular adecuada a esa forma de trabajo. Aunque el evitar flexiones en el arco no es como tal el objetivo fundamental que se busca con esta configuración, pues el hormigón armado trabajando a compresión puede, por supuesto, resistir flexiones substanciales. Sí es, en cambio, una ventaja significativa el poder reducir al límite el volumen del arco, pues simplifica en buena medida la cimbra que se requiere para construirlo. Una vez concluido, el mismo arco de hormigón puede soportar el peso del tablero durante su construcción, cuyas fases deben por otro lado estar cuidadosamente estudiadas para evitar flexiones no previstas en el arco. En cualquier caso, además de posibles motivaciones estructurales o constructivas, sin duda Maillart se vería también seducido al realizar este tipo de obras por el atractivo visual de un arco de tanta ligereza.

Robert Maillart (1872-1940).

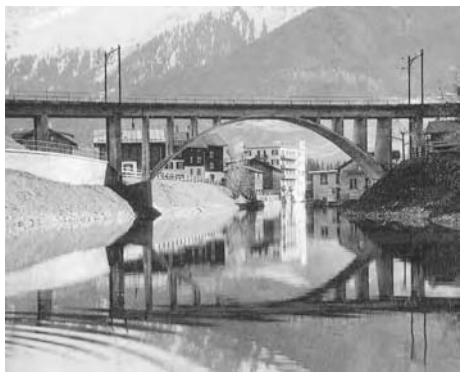


Cálculos manuscritos de Robert Maillart para el puente de Flienglibach (1923).

El mismo año en que Maillart terminó el arco de Klosters, se concluía el puente de Plougastel, una de las obras más importantes que se hayan construido en hormigón y obra del otro gran nombre de los inicios de este material en la primera mitad del siglo XX: Eugène Freyssinet. Desde la primera década del siglo XX, Freyssinet había estado trabajando, al igual que Maillart, como diseñador y constructor de puentes de hormigón armado, y ambos coincidieron en rechazar para su proyecto aproximaciones excesivamente teóricas o normalizadas, valorando en cambio más la experimentación y la intuición, sin que por ello menospreciasen, por supuesto, los rigurosos cálculos necesarios (algunas de las claras y concisas hojas manuscritas de los cálculos de Maillart supondrían un auténtico tesoro en muchas notas de cálculo actuales, que inundamos de impresiones tipo e infumables listados de ordenador, como si tuviesen que valorarse al peso). Las obras de ambos guardan, en cambio, marcadas diferencias dentro de una común excelencia, siendo las del francés de una mayor escala y controlada robustez, y en cambio las de suizo fruto de una extrema sutileza en la elección de la forma.

El trabajo de Freyssinet, como el de la mayoría de sus contemporáneos, se concentró en los puentes carreteros entre los que cuenta con obras muy conocidas, aunque también trabajó por supuesto para el ferrocarril, con puentes como el de Candelier, un arco

Puente de Klosters sobre el río Landquart (Suiza, 1930). Alzado, cimbra y vista general.



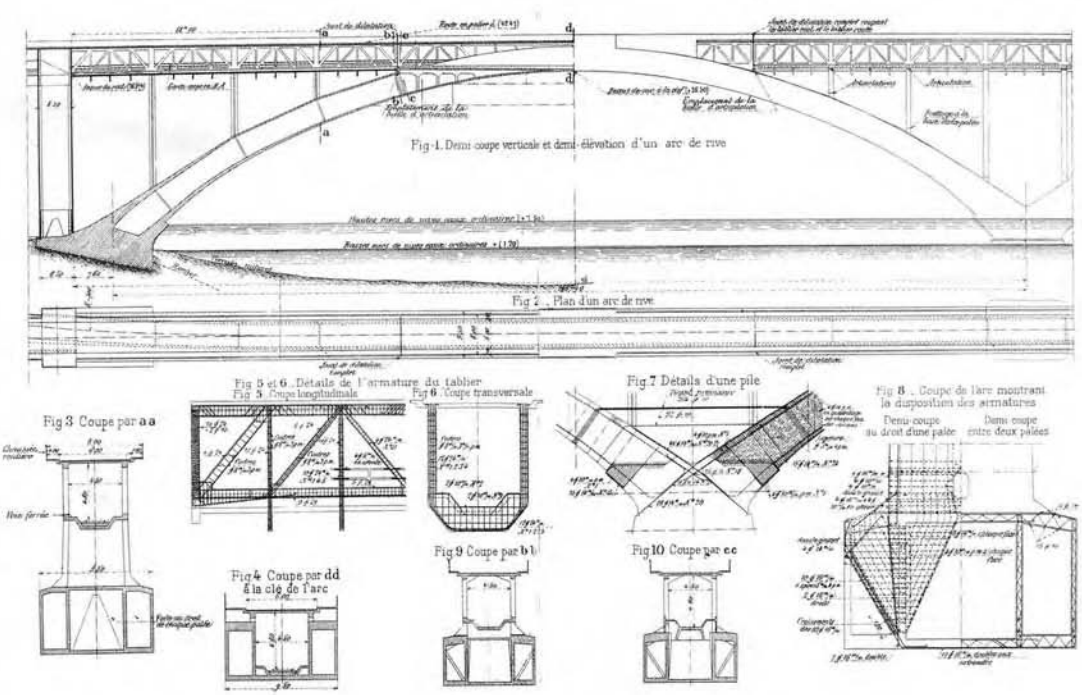
Puente de Plougastel para ferrocarril y carretera sobre el estuario del Elorn en la Bretaña francesa (1930).

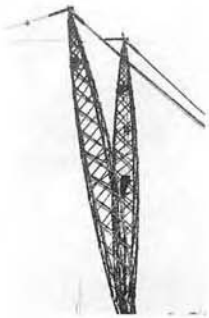
biarticulado de 64 metros que construyó en 1922 para el ferrocarril Niza-S. Sauveur. Pero entre todas sus obras los mayores arcos serían los del mencionado puente de Plougastel, de uso mixto (bajo el tablero superior para el ferrocarril discurría otro inferior para la carretera).

La enorme estructura con tres arcos de 180 metros sobre el estuario de Elorn, en la Bretaña francesa, se completó en 1930 tras cinco años de trabajo, aunque uno de sus vanos tuvo que reconstruirse en 1946, pues las tropas alemanas en retirada lo habían volado en la segunda guerra mundial. Este puente superó casi cualquier cifra anterior en puentes de hormigón armado. Su estructura no por monumental perdió en claridad. Fue pionera en el uso de la sección en cajón para un arco, cuya flecha sobre el nivel del agua era de 27.5 metros, y tenía un canto de 4.5 metros en clave y una anchura algo superior a los 9 metros. Pero más allá de su gran envergadura, el principal reto de este puente sería el método que habría de permitir construirlo sobre un estuario sobre el que resultaba impracticable apoyar cimbras. Freyssinet ingenió una cimbra de madera en arco atirantado que, autoestable, flotaba sobre dos grandes pontonas. Era una notable estructura en sí misma que usó sucesivamente para hormigonar los tres arcos, en uno de los procesos de construcción con cimbra más sobresalientes que se hayan llevado a cabo.

Este puente fue además para Freyssinet un inigualable banco de pruebas en su estudio de las propiedades reológicas del hormigón, la fluencia y la retracción, por las que mostró gran interés desde el inicio de su carrera; esta preocupación nació en 1912 cuando en una de sus primeras obras, un muy rebajado arco triarticulado para carretera que construyó sobre el Veurdre, empezó a experimentar importantes descensos en clave un tiempo después de su exitosa culminación. Tratándose de un arco particularmente rebajado estos crecientes desplazamientos ponían sin duda en riesgo la integridad de la estructura. Sin explicación conocida para tal comportamiento, pues el hormigón se tenía como un material perfectamente elástico, Freyssinet solucionó el problema introduciendo gatos en la clave del arco para separar ambos semiarcos y recuperar así el descenso que se había producido, para después cerrar la clave y rescatar de su agonía a un puente que desde entonces ha ofrecido un adecuado comportamiento. El estudio continuado por parte de Freyssinet de las deformaciones diferidas del hormigón y sus propiedades reológicas partió de este suceso y encontraría culminación en la experimentación llevada a cabo en el puente de Plougastel, siendo, como veremos, decisivo para la que fue su mayor aportación a la ingeniería y posiblemente uno de los más significativos avances estructurales de nuestro tiempo: el hormigón pretensado.

Plano de alzado y sección longitudinal. Esquemas de detalle. Varias imágenes del proceso constructivo y de la flotación de la cimbra entre arcos sucesivos.



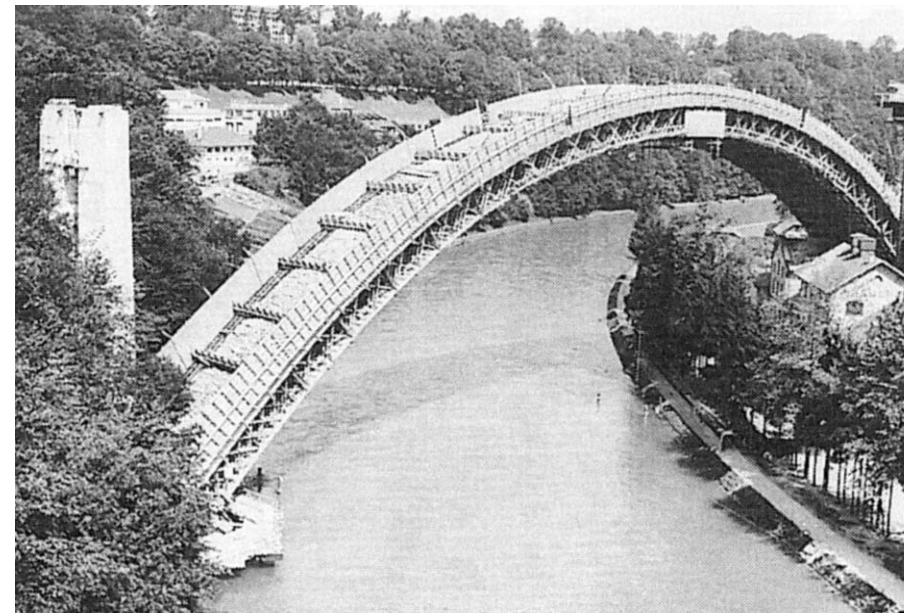


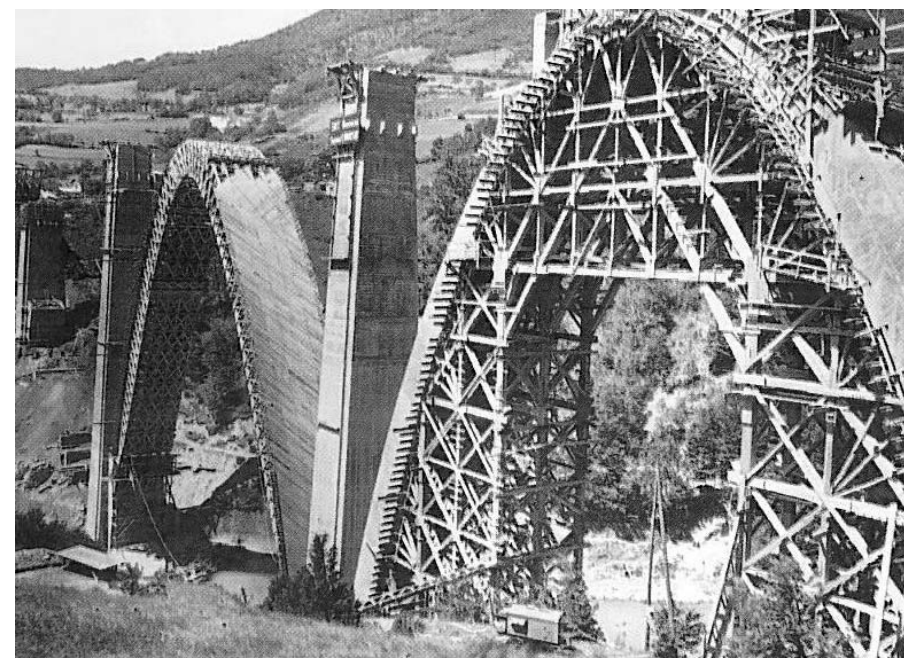
Puente de Traneberg (Estocolmo, 1934).

Tradicionalmente una de las fases más delicadas en la construcción de arcos de hormigón era el descimbrado, que debía ser simultáneo en todos los puntos de arco para no crear condiciones no simétricas de apoyo que pudieran generar flexiones no previstas en la bóveda. Esta problemática la solucionó por primera vez Freyssinet precisamente en el arco de Veurdre al emplear gatos en clave para producir, empujando ambos semiarcos entre sí, un ascenso de todo el arco que lo descimbraba de forma controlada. Emplear este sistema resultó providencial, pues los huecos previstos para los gatos le permitirían después volver a introducirlos para salvar como hemos visto la grave problemática que se le plantearía en relación con el imprevisto acortamiento del hormigón. Este ha sido el método que desde entonces se ha empleado para descimbrar la inmensa mayoría de grandes arcos de hormigón que se han construido sobre cimbra. En los puentes no articulados en apoyos los gatos para el descimbrado pasaron a situarse en arranques o en los riñones.

Freyssinet participaría cuatro años después como consultor durante la construcción del arco de Traneberg en Estocolmo, que con 181 metros de luz arrebató al puente de Plougastel la posición como mayor arco de hormigón para el ferrocarril. La opción de los grandes arcos de hormigón se vio impulsada por estas obras, y se construyeron varios puentes de este tipo para el ferrocarril en los siguientes años. El puente sobre el río Aare en Suiza, por ejemplo, sustituyó en 1940 un antiguo viaducto de ferrocarril, lo que sirvió para mejorar el trazado que con el cambio pasó a ser de 4 vías. La longitud total del viaducto es 1.150 metros, de los que 150 son salvados por el arco principal. Fue el más largo viaducto de hormigón para el tren hasta ese momento, aunque el tablero se ejecutó con juntas sobre los arranques del arco como era entonces práctica habitual, probablemente para facilitar el análisis del puente. Con una sobrecarga de uso en torno a los 30 KN/m^2, los arcos y tableros para el ferrocarril resultaban inevitablemente más pesados que sus contemporáneos para la carretera, en los que las sobrecargas de diseño eran entre 4 y 5 veces inferiores. Aún así, puentes como el de Aare proporcionan una lograda sensación de armonía y elegancia, lo que fue sin duda consecuencia de una cuidada atención a los detalles y a la ejecución, que se ha traducido en una vida útil de más de 60 años sin operaciones de mantenimiento significativas.

Otro puente sin duda destacable es el de Longeray sobre el Ródano, característico por presentar una altura de 70 metros que superan los 60 salvados por el arco. Se construyó en 1943 empleando, para el vano sobre el río, una cimbra que se construyó en dos mitades verticales en ambos márgenes del río para ser después inclinadas hacia el cauce hasta unirlas para conformar la cimbra definitiva.



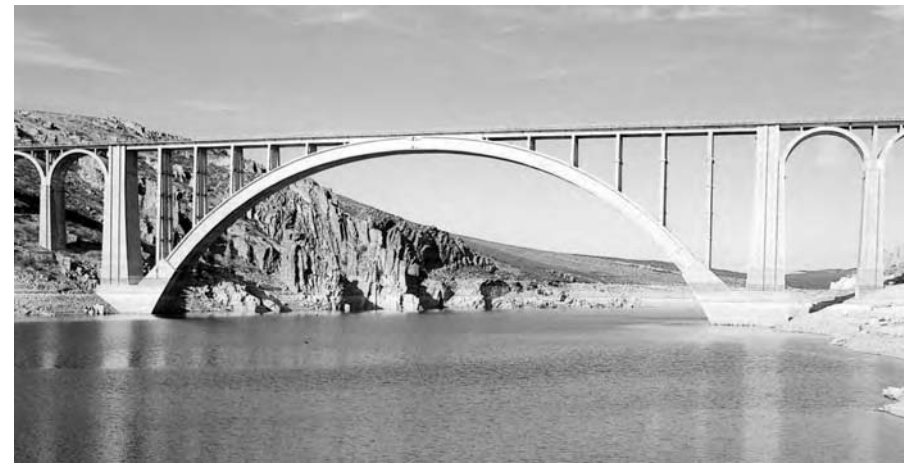


Puente sobre el río Aare (Suiza, 1940) y puente de Longeray sobre el Ródano (Francia, 1943). Vistas generales de ambos puentes y sus cimbras.

Pero entre todos los arcos construidos en esta época, el mayor, superando incluso a los arcos de hormigón para carretera que se hubiesen construido, fue el viaducto de Martin Gil, proyectado por el ingeniero que le dio nombre y que murió sin embargo cuando apenas se había iniciado la construcción, de la que pasó a hacerse cargo nuestro insigne Eduardo Torroja, en la que fue la más destacada de sus poco numerosas obras para el ferrocarril.

Cuando los principales accesos al viaducto y la cimbra de madera que habría de soportar el hormigonado del gran arco ya se habían completado, el estallido de la guerra civil interrumpió la obra durante tres largos años en los que la cimbra ya levantada tuvo que sufrir la dura climatología de la meseta castellano-leonesa. Los fuertes cambios estacionales de temperatura y sobre todo de humedad habían mermado la resistencia de la cimbra, que mostraba preocupantes deformaciones ante el viento, y que no se consideró adecuada para soportar la construcción de un arco de hormigón cuya luz de 209 metros no tenía ningún precedente a nivel mundial.

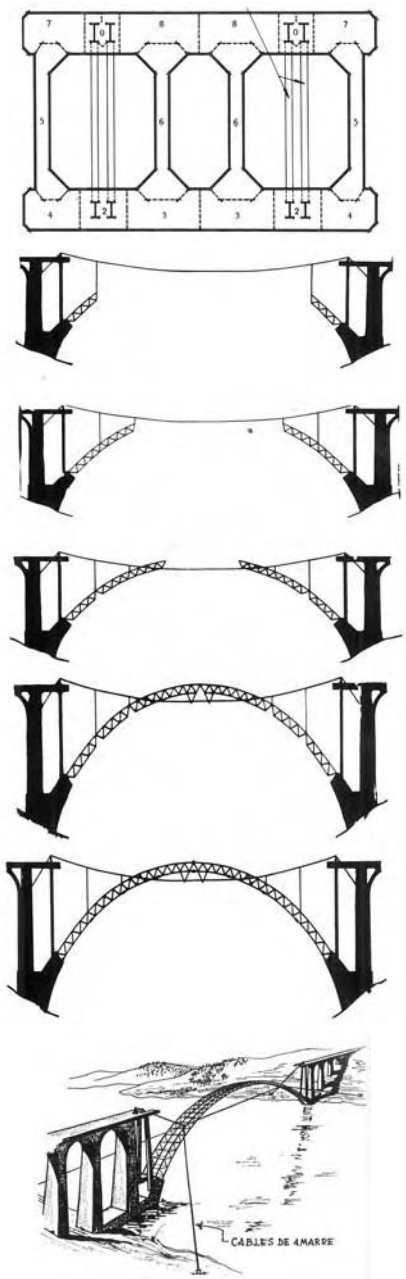
Los rigores económicos de la posguerra hicieron de la renuncia a la cimbra existente una decisión dolorosa y de la necesidad de reemplazarla por otra con un coste controlado quizás el principal reto del proyecto, pues los requerimientos estructurales para resistir a 110 metros de altura sobre el fondo del embalse el peso de un arco de tales dimensiones parecían directamente enfrentados con la economía de la posible solución. Torroja planteó un eficaz proceso de construcción basado en el ya descrito sistema Melan que permitió una exitosa ejecución con un coste razonable. Así pues, pro-



Viaducto de Martín Gil sobre el embalse del río Esla en la presa de Ricobayo (Zamora, 1942).

(en página derecha)

Viaducto de Martín Gil. Sección transversal del arco indicando el orden de hormigonado de los diferentes cordones. Montaje de la cimbra o armadura rígida empleando un cable provisional de apoyo. Sistema de rigidización transversal de la estrecha cimbra mediante tirantes.



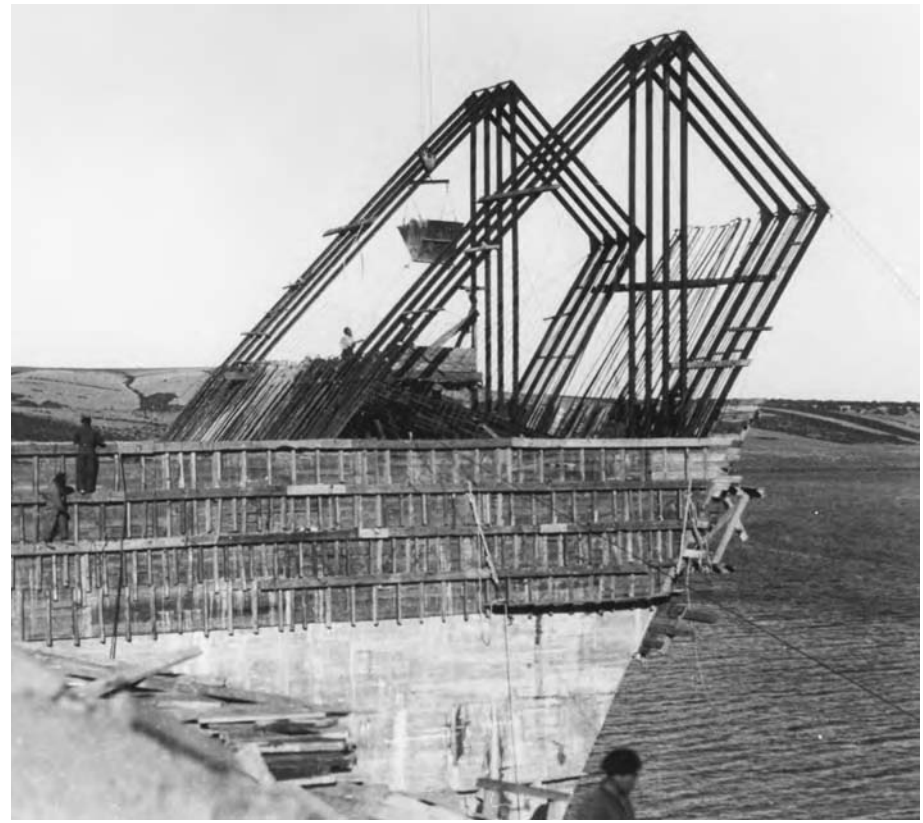
yectó una cimbra metálica rígida que habría de quedar dentro del propio arco de hormigón a construir, manteniendo después su utilidad como armadura de éste en la etapa de servicio. El atractivo de que la costosa cimbra abandonase la categoría de obra muerta pasando a aprovecharse en el propio arco, cuyas armaduras podían abaratarse, otorgaba licencia para invertir en una suficiente robustez de la cimbra, pero tenía también inconvenientes, pues no era sencillo determinar el grado de colaboración en servicio de unos perfiles metálicos con reducida adherencia con el hormigón y, sobre todo, el sistema iba inevitablemente asociado a un complejo y delicado proceso de hormigonado.

En este caso se planteó un inteligente sistema de fases, hormigonando primero las cabezas superiores de los dos cuchillos laterales que componían la cimbra y después las inferiores cuyo peso colgó ya de los previamente hormigonados cordones superiores. Se contó a partir de entonces con una cimbra mixta más rígida y capaz para pasar a soportar el grueso del hormigón que habría de componer la sección del arco, y que se fue también hormigonando por fases de forma que el cordón longitudinal materializado en cada etapa contribuía ya a resistir el peso del hormigón fresco en la siguiente. De ese modo se fue completando la sección transversal del cajón tricelular en un proceso no exento de dificultades, pues el hormigonado por fases tiene gran sentido de cara a la optimización de la cimbra, pero en cambio debe resolver el problema de que cordones hormigonados en distintas fases experimentarán acortamientos por retracción diferenciales, y tendrán en un principio diferentes grados de solicitación en función de si empezaron a resistir antes o después. Lógicamente, la propia fluencia del hormigón habría de tender con el tiempo a mitigar estas diferencias, pero además en este caso se optó por subdividir el hormigonado de cada cordón por dovelas, dejando huecos transversales entre ellas que se hormigonaban semanas más tarde, una vez se habían producido la mayor parte de las deformaciones por retracción de cada dovela. No cabe duda, por otro lado, de que la espera de los tiempos de fraguado y de máxima deformación por retracción en cada fase ralentizaron un proceso de gran lentitud en el que cabe suponer que el plazo no fue un condicionante fundamental, pues de hecho el tren de Zamora a La Coruña tardaría bastante tiempo en cruzar por primera vez el viaducto incluso una vez éste se hubo finalizado en 1942.

También de interés es el sistema de rigidización transversal frente al viento que ideó Torroja, que consistía en una serie de cables firmemente anclados a las laderas rocosas dotados de dispositivos adecuados para regular la tensión. Los puntos de anclaje en la cimbra pasaban a través de ranuras verticales, de forma que esta quedase fijada en el plano transversal pero liberada frente a los movimientos en el plano vertical. Todo ello vino particularmente motivado por la reducida anchura transversal de la cimbra, cuyas

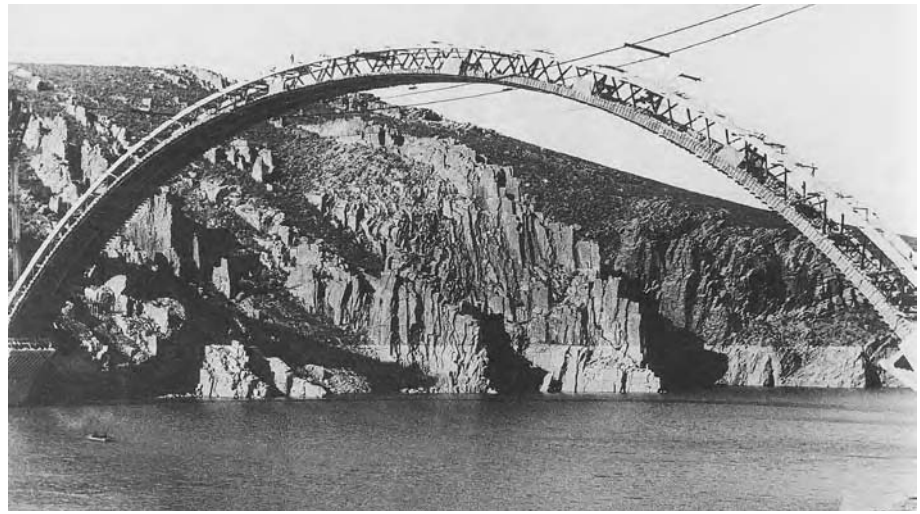
paredes o cuchillos laterales Torroja prefirió dejar dentro de los huecos de la sección y no embebidas en las estrechas almas laterales, donde podrían haber provocado superficies de fácil deslizamiento y rotura del hormigón. El sistema probó su necesidad y eficacia cuando sobrevivió con éxito a los vientos huracanados de la noche del 15 de febrero de 1941, en la que se midieron velocidades de hasta 180 km/h, y que años más tarde, en el artículo sobre el gran puente titulado "Un arco que fue un triunfo" se rememoraba así:

"Yo recuerdo a aquel hombre extraordinario que fue Don Antonio Salazar, contándome pocos días después y casi con lágrimas en los ojos, cómo se había pasado toda la noche de rodillas, rezando junto a la obra para pedirle a Dios que no derrumbara la delicada cimbra, porque aquello sería un desastre para la obra e incluso para su prestigio personal, aunque yo le decía que no era posible luchar contra los elementos. Por fortuna no hubo deformación alguna".



Viaducto de Martín Gil. Imagen de la ejecución de los arranques del arco sobre lo que habría de apoyar la cimbra o armadura rígida.

(en pag derecha) Imágenes de la cimbra y del proceso de hormigonado.



Puente de Pfaffenberg en la línea ferroviaria de Tauern (Austria, 1971).

Viaducto de Luarca.

Puente sobre el Sil en el ferrocarril de vía estrecha (línea Villablino-Ponferrada).

Hoy, el espléndido arco sobre el embalse del Esla se mantiene como uno de los mayores arcos de hormigón para ferrocarril del mundo y junto a él son muchos los puentes arco de hormigón de las líneas ferroviarias españolas que merecerían mención y entre los que cabe citar viaductos como el del río Ulla, de la misma línea, o como los de Luarca, del río Miño en Ourense, o el del río Sil en la línea minera de Villablino a Ponferrada.

Aunque casi 30 años posterior, un arco de similar luz al de Martín Gil es el del puente de Pfaffenberg en Austria, construido en 1971 con una luz de 200 metros y una flecha de sólo 50 m. Se trata sin duda de otra espléndida muestra de como, incluso bajo el condicionante de las pesadas cargas ferroviarias, soluciones de notable esbeltez son posibles tanto en el arco como en los montantes verticales para el apoyo del tablero.

Los arcos de hormigón para el ferrocarril han sido en su gran mayoría de tablero superior, aunque por supuesto existen también ejemplos de arcos atirantados o de tablero intermedio, entre los que sin duda destaca el viaducto de la Mediterranee, construido en 1950 sobre el Ródano y que con sus 124 metros de luz fue el mayor del mundo entre los de su clase.

Pero en el panorama general de la construcción de puentes estos magníficos puentes en arco pueden considerarse excepcionales, pues a partir de la segunda guerra mundial, y particularmente con la fuerte subida en el coste de la mano de obra en los años 60, los puentes en arco fueron cayendo en desuso bajo el peso de los costosos encofrados y cimbras o autocimbras que requerían y, sobre todo, ante la consolidación de un nuevo concepto en la construcción con hormigón, el pretensado, que como veremos convertiría los puentes de vigas, de mayor sencillez, en una nueva y ventajosa alternativa más allá de las pequeñas luces. Un cierto resurgimiento de los arcos de hormigón llegaría, como les había sucedido a los de acero un siglo antes, con el desarrollo de métodos constructivos que permitiesen prescindir de las cimbras; entre ellos, el principal es el que se basa en el avance mediante voladizos provisionalmente atirantados. Este fue el método empleado, por ejemplo, en uno de los escasos puentes arco de hormigón de las modernas líneas de alta velocidad, construido en 1987 en Alemania sobre el río Main por Leonhardt y Andra. Se trata de un delgado arco poligonal de 162 m de luz con un espesor variable que no supera los 1.8 metros y que funciona por tanto en gran medida como los mencionados arcos tipo Maillart, en los que es la gran rigidez del tablero, y no la del esbelto arco, la encargada de soportar las flexiones de las cargas no simétricas.

En este caso, el tablero se empujó sobre las pilas tras la construcción del arco, con lo que los tirantes provisionales siguieron jugando un papel importante, una vez cerrado

Puente del Lanthal (LAV Colonia-Rhine, 2001).

Puente sobre el río Nervión (metro de Bilbao, 2003). En construcción y en servicio.

Viaducto de alta velocidad sobre el Main cerca de Veitshöchheim (Alemania, 1987).

éste, para absorber las importantes flexiones que habrían de generarse cuando el tablero sólo apoyase en una mitad del arco. La flexión en el arco, en cualquier caso, tuvo que reducirse disponiendo lastre en el semiarco no cargado durante el lanzamiento.

Otro ejemplo de arco en las líneas alemanas de alta velocidad es el puente de Lahntal en la línea entre Colonia y Rhine. Completado en el 2001, el arco salva una luz de 116 metros, aunque en este caso el concepto del arco se diluye pues el tablero sólo le transmite carga en clave.

Aunque no perteneciente a una línea de alta velocidad sino a una línea del metro de Bilbao, conviene también recoger, por último, el arco de sobre el río Nervión, que como el anterior es una solución que está en el límite del concepto de un arco, pues de nuevo el tablero se apoya en el arco únicamente en la zona central donde ambos se solidarizan, de forma que desde un punto de vista estructural la estructura linda entre un arco y un pórtico. Su luz de 60 metros no es elevada tratándose de un arco, pero en cambio destaca la originalidad de su procedimiento constructivo, que consistió en construir los dos semiarcos en una posición prácticamente vertical sobre sendos arranques articulados, para posteriormente girarlos hasta unirlos en clave. Se trata de un proceso simple en concepto pero muy delicado en su ejecución, siendo crítico el controlado estudio de los semiarcos en sus diferentes estados intermedios, siempre más desfavorables que su situación final. Es de los pocos procesos constructivos de puentes de hormigón que no tiene un antecedente más o menos directo en los puentes metálicos del siglo XIX; probablemente sus primeras aplicaciones no fueron destinadas a la ejecución de los arcos de los puentes sino a la de sus cimbras, siendo la del arco central del citado puente de Longeray, antes mostrada, uno de los más notables ejemplos, ya en 1943.

En cualquier caso, y pese a estos notables ejemplos de como hoy los arcos de hormigón se siguen desde luego empleando para el ferrocarril, no es menos cierto que lo hacen siempre bajo la vitola de obras singulares, perdida ya la generalidad que esta tipología alcanzó con los puentes de piedra o los primeros puentes de hormigón armado y que, actualmente, han hecho suya los puentes viga de hormigón pretensado.

3. 3 Los Puentes viga de hormigón y el pretensado

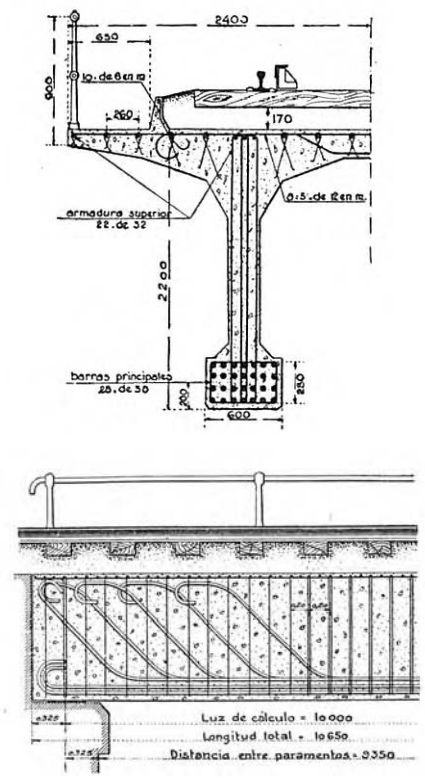
Si lento fue el paso de las primeras construcciones de hormigón armado de finales del siglo XIX a los grandes arcos para el tren que la capacidad a flexión del nuevo material habría de permitir varias décadas después, más todavía se tardó en empezar a emplear el hormigón para conformar vigas de puentes. Sólo en la segunda década del siglo XX dejaron éstas de ser excepcionales, aunque en general se destinaban a puentes de carretera y con luces inferiores a los 20 metros.

Esto contrasta hasta cierto punto con el rápido desarrollo y consolidación del hierro que se había vivido en los inicios de la era del tren durante la primera mitad del siglo anterior, en la que apenas dos décadas después de la primera línea se estaba construyendo ya el puente de Britannia. Contraste que, por otro lado, no está carente de lógica, pues aunque el hormigón armado habría de ser ventajoso en muchos aspectos, no llenaba un vacío como en su día había hecho el hierro. En efecto, los primeros ingenieros del tren del siglo XIX se vieron en muchas ocasiones sin otra alternativa que experimentar con el novedoso hierro para salvar los grandes obstáculos que imperativamente el tren debía cruzar. La llegada del hormigón, en cambio, encontró ya una alternativa válida en los puentes metálicos, y por lo tanto los ingenieros no necesitaron trabajar con el nuevo material hasta que poco a poco se fueron consolidando las ventajas que en no pocos casos podía ofrecer frente al acero.

En los primeros días del hormigón, se desconfiaba de éste para los puentes de ferrocarril y Ribera, uno de los pioneros españoles del hormigón armado, explica en alguno de sus escritos cómo incluso no era infrecuente encontrar ingenieros temerosos de que, siendo el hormigón un aglomerado, las grandes cargas móviles y el continuo traqueteo del tren pudiesen producir la disgregación y pérdida de capacidad del material. La labor de Zafra y del mismo Ribera en la difusión de conocimiento y confianza en el nuevo material durante las primeras décadas del siglo XX fue sin duda decisiva en España.

En los años 20 los puentes viga con hormigón armado eran ya numerosos y empezaban a emplearse con frecuencia en toda Europa. Rápidamente se tendió a la sección en forma de π, consecuencia lógica de extrapolar a los puentes la configuración que se venía empleando en los forjados de numerosos edificios.

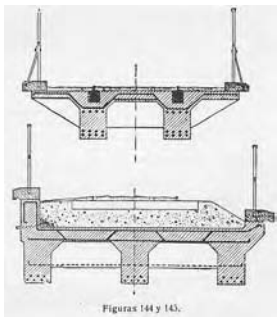
Sección transversal y longitudinal de un puente viga de hormigón armado planteado por José Eugenio Ribera a finales de los años 20.

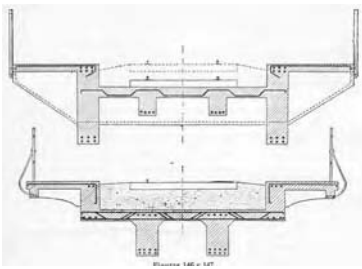


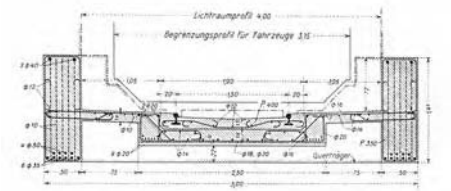
(dcha.) Sección transversal tipo de un puente de hormigón en los primeros años de RENFE (1940).

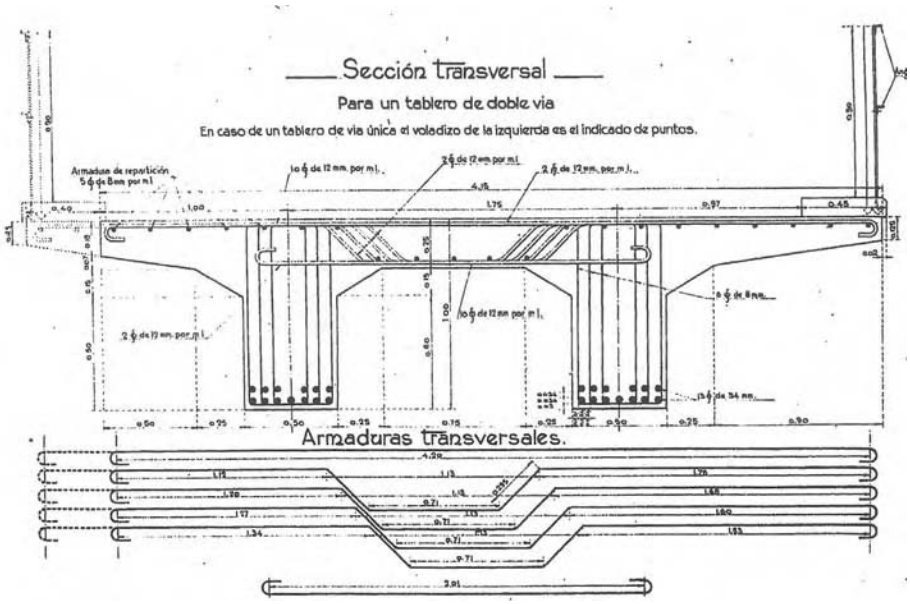
Diversas variantes de la sección en π en las líneas alemanas de principios de siglo.

Sección transversal y fotografía del puente ferroviario de vigas laterales sobre el río Birs (Suiza, 1935).



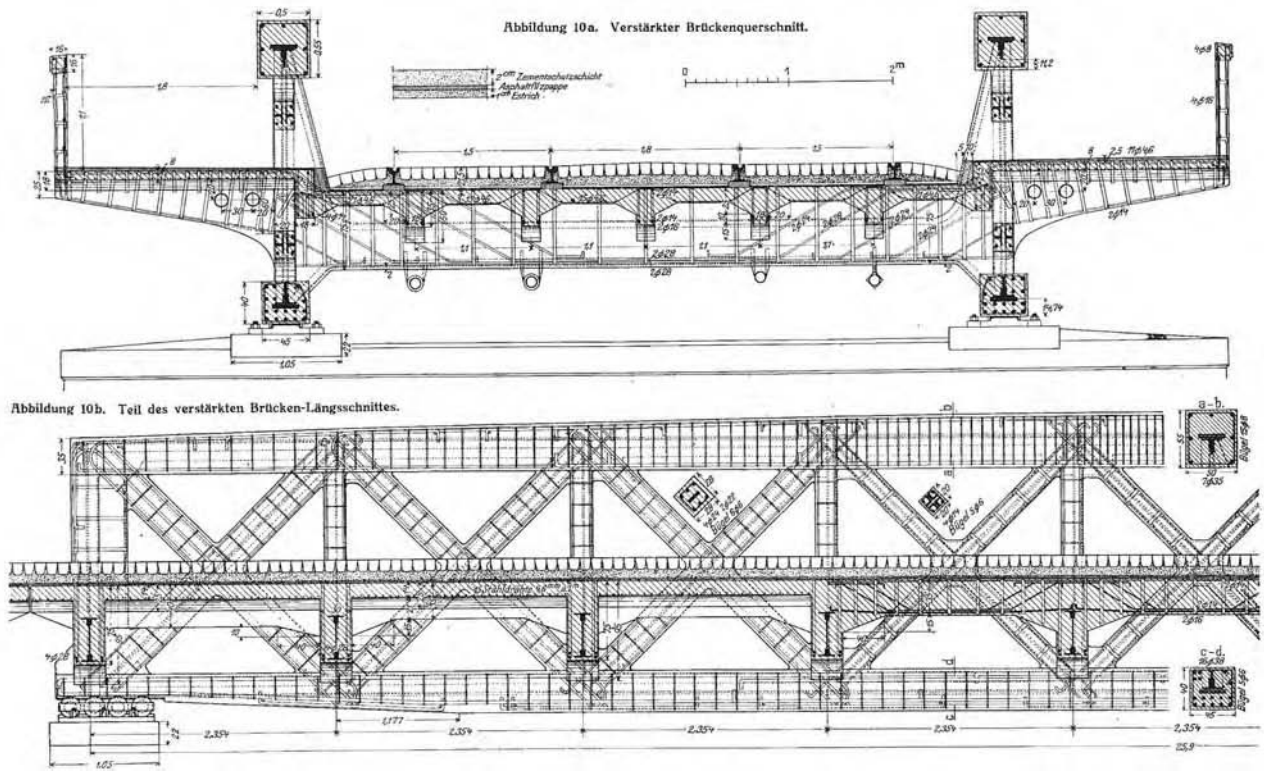






En los años 30 esta tipología se empleó por doquier para pequeños puentes y a principios de los 40, en España, el servicio de Estudios de Vías y Obras de la recientemente creada RENFE tenía ya una completa colección de tableros tipo basados en esta sección transversal. Para las pequeñas luces esta solución resultaba sin duda más económica, y tenía la ventaja de que el propio material estructuralmente activo para la resistencia global del puente conformaba a su vez la plataforma para el paso de los vehículos, lo que no sucedía ni con los puentes en arco ni con los de vigas metálicas. En cualquier caso se recomendaba pasar a emplear el arco para luces por encima de los 15 metros, en particular durante toda la posguerra en la que el acero escaseó, encareciendo considerablemente las soluciones en las que el esfuerzo predominante es el de flexión. Infinidad de puentes de este tipo se construyeron en Europa para luces cortas y medias, con ejemplos notables como en el del puente de Liesberg, obra de Maillart, con el que el ferrocarril suizo superaba en 1935 el río Birs.

Una vía de ir a mayores luces se buscó, bajo la inspiración de los puentes metálicos, planteando celosías de hormigón armado. La triangulación, de la que tan eficiente uso se venía haciendo con el acero, no se adapta sin embargo tan bien a las cualidades del hormigón, y en general la economía de material que se pretendía alcanzar no compensó la gran dificultad de encofrar, armar y hormigonar estructuras conformadas por tan-



Sección transversal y alzado de un puente de doble vía con vigas en celosía sobre el río Ruhr (Alemania).

Puente de hormigón en celosía en las obras de acceso de la alta velocidad a la Estación de Sants (Barcelona, 2006)

tos elementos diferentes. Aún así, en la primera mitad del siglo XX se construyeron con hormigón no pocos puentes en celosía, sobre todo para carreteras. Aunque cayeron pronto en desuso, no han faltado obras de este tipo incluso en puentes modernos. Los japoneses, por ejemplo, construyeron en los años 70 puentes como el de Iwahana, análogo a una típica viga Warren del siglo XIX en la que el ferrocarril cruza por su interior, sólo que empleando en este caso hormigón pretensado de alta resistencia. Existen otras realizaciones, pero en general el empleo de soluciones trianguladas con hormigón es excepcional y hoy sólo encuentra cabida, generalmente de la mano de la prefabricación, en obras singulares como ha sido el caso, por ejemplo, de los puentes urbanos de hormigón prefabricado para el acceso de la alta velocidad a la estación de Sants en Barcelona, o el puente en celosía con el que el metro de Bilbao cruza el río Nervión, construido por voladizos sucesivos con singulares dovelas prefabricadas en forma de "Z".

Volviendo a la primera mitad de siglo, a finales de los años 30 y principios de los 40, cuando los grandes arcos de hormigón proliferaban en Europa, también las vigas de hormigón armado crecían, pero, conforme lo hacían, sus limitaciones se hacían más patentes. Inevitables fisuraciones y deformaciones se presentaban frecuentemente de forma severa, con los consiguientes problemas de durabilidad y funcionalidad. Ello llevó a aumentar los cantos, con relaciones canto/luz generalmente superiores a 1/10, lo que comprometía la imagen y competitividad económica de estas obras y era muestra evidente de las inherentes limitaciones del hormigón armado que, simplemente, había llegado ya al umbral de su aplicabilidad eficiente en puentes viga.

Puente de hormigón en celosía sobre el río Nervión (metro de Bilbao, 2004). Imagen de una dovela prefabricada y del puente en construcción.

Pero, por entonces, en la mente de algunos de los más grandes ingenieros del momento había cogido ya forma una idea que habría de situar al hormigón en la vanguardia de la ingeniería de puentes. La idea del pretensado, entendido como la creación de un estado artificial de tensión que se anticipa a las cargas que actuarán sobre una estructura para mejorar así su comportamiento, se remontaba en realidad a mucho tiempo atrás. Es, al fin y al cabo, el mismo concepto que se venía usando, por ejemplo, para evitar que el agua se saliese de un barril o que los finos radios de la rueda de una bicicleta se doblasen al recibir peso. Aplicado al hormigón, lo que requirió una admirable lucidez ingenieril y una significativa sofisticación tecnológica, revolucionaría la construcción de puentes.

La idea de aplicar una tensión previa a los refuerzos de acero en el hormigón había estado en la mente de varios ingenieros casi desde el principio del hormigón armado, pues ésta parecía una forma natural de comprimir las piezas para luchar contra la indeseable fisuración (hoy entendemos que la fisuración forma parte del propio mecanismo resistente del hormigón armado y que no es por tanto algo indeseable sino, sencillamente, algo a controlar). Sin embargo todos los primeros intentos para precomprimir el hormigón con barras o cables en el primer tercio de siglo fueron infructuosos, pues no se concibieron con un conocimiento suficientemente profundo de las propiedades del hormigón. Conocimiento que desde sus primeros puentes sí venía atesorando Eugène Freyssinet, primero en reconocer la gran relevancia y fabulosas posibilidades que podría ofrecer el "nuevo material", como no injustificadamente él acostumbraba a llamar al hormigón pretensado.

Los antecesores de Freyssinet, e incluso el alemán Dischinger que fue el primero en aplicar sus ideas en Alemania, fracasaron en sus primeros intentos de construir estructuras pretensadas fundamentalmente por desconocimiento de las deformaciones diferidas del hormigón, que se resistían a permitir su precompresión prolongada. Dos decisivas propiedades del hormigón las provocan: la retracción y la fluencia. La retracción

es la contracción que experimenta el hormigón durante su fraguado (que es del orden de 1mm por cada 4 ó 5 metros), y la fluencia es el acortamiento que experimenta el hormigón bajo una carga mantenida, aunque ésta no aumente (el acortamiento por fluencia depende de la carga aplicada y, para piezas pretensadas, puede ser superior a largo plazo al de la retracción, aunque no de mayor orden de magnitud). Ambas propiedades, en definitiva, hacen que el tablero de hormigón y con él las barras o cables que lo precomprimen, reduzcan su longitud, lo que lógicamente se traduce en una pérdida de la fuerza que éstas aplican sobre el hormigón. Si la tensión con la que estaban pretensadas no es muy alta, su carga, junto con sus beneficiosos efectos, puede perderse prácticamente por completo cuando a lo largo del tiempo la retracción y la fluencia hacen que el hormigón experimente acortamientos.

Ya hemos visto cómo en los primeros arcos de hormigón armado que construyó, a principios del siglo XX, Freyssinet se topó de lleno con la fluencia. Desde entonces vino estudiando este efecto, cuyo definitivo banco de pruebas fue el puente de Plougastel. Así pues, Freyssinet era plenamente consciente de los acortamientos que habría de experimentar el hormigón, y por ello abogó desde un principio por emplear para pretensarlo aceros de alto límite elástico. Éstos podían alcanzar una tensión muy alta al aplicar la fuerza de pretensado, de modo que las inevitables pérdidas de tensión que resultasen del acortamiento del hormigón fuesen tan sólo una parte controlada de la tensión inicial.

Ya el mismo año en que concluyó el puente de Plougastel Freyssinet escribiría: *"Demostraré que estos hormigones compactos, unidos a aceros de alto límite elástico en tensión previa, constituyen un modo de construcción totalmente nuevo que ofrece posibilidades muy diferentes de las del hormigón armado común (…). Se dan, en mi opinión, todos los elementos necesarios para una transformación total, una verdadera revolución en los métodos, los costes y las alternativas técnicas de las construcciones de acero y hormigón"* [1].

El gran ingeniero francés estaba tan convencido del potencial de la idea que venía madurando desde el inicio de su carrera que, a los 50 años, lo dejó todo para dedicarse a ponerla en práctica. Los primeros tiempos de esta emprendedora aventura, sin embargo, lo acercaron a la ruina pues no encontró un mercado para los productos pretensados (por ejemplo, postes para farolas) que fabricó. Pero como quien siembra recoge, su oportunidad acabó presentándose. En 1935 Freyssinet se ofreció para recalzar una cimentación que se encontraba en precario en unas importantes estructuras portuarias en Le Havre, cuya situación mantenía en vilo a la comunidad ingenieril francesa sin que nadie hubiese sido capaz de dar con una posible solución. Cuando, mediante potentes pero delicados elementos pretensados, Freyssinet fue capaz de transmitir la

[1] Eugène Freyssinet. Un Ingeniero Revolucionario. Fundación Esteyco. Madrid, 2003.

Portada de la primera patente de Freyssinet (París, 1928).

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE.

MINISTÈRE DU COMMERCE ET DE L'INDUSTRIE.

DIRECTION DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE.

BREVET D'INVENTION.

Gr. 7. — Cl. 1. N° 680.547

Procédé de fabrication de pièces en béton armé.

MM. Eugène FREYSSINET et Jean SEAILLES résidant en France (Seine).

Demandé le 2 octobre 1928, à 16h 20m, à Paris.
Délivré le 22 janvier 1930. — Publié le 1er mai 1930.

[Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'art. 11 et 17 de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.]

La présente invention a pour objet une méthode de fabrication de pièces ou éléments en béton armé montés d'avance et destinés à n'être employés ou mis en place qu'après leur prise et leur durcissement, tels que poteaux, poutres, formes, traverses de chemin de fer, cuvelages, clôtures, panneaux, etc.

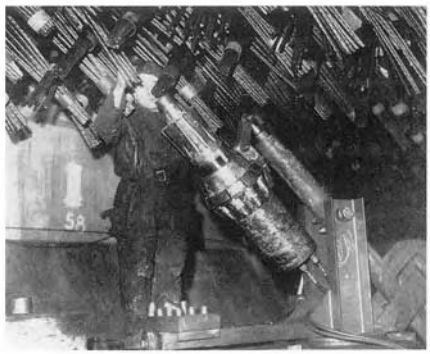
Dans les procédés habituels on utilise le béton pour enrober les armatures que l'on place dans le moule sans qu'elles aient à subir une tension initiale pendant la fabrication. Dans la pièce terminée, le

Dans ce but, les armatures sont tendues au moyen de tout dispositif convenable dans le moule de façon, non seulement à les raidir, mais encore à les y soumettre à un effort de traction plus ou moins important, mais qui pourra être poussé plus loin, en vue de leur donner une tension initiale qui sera généralement d'un ordre tel, qu'elle correspondra à un allongement élastique important du métal.

Les armatures ainsi tendues, sont de préférence pourvues de dispositifs d'ancrage destinés à transmettre au béton après prise,

[2] En el hormigón pretensado, en cambio, los aceros de alto límite elástico parten ya de una tensión elevada. La deformación que de ello se deriva queda neutralizada al deslizar el cable de pretensado por las vainas huecas que lo alojan en el interior del hormigón cuando se tensa. Inyectando después las vainas, como desde un principio previó Freyssinet para asegurar la adherencia del acero activo con el hormigón, la gran capacidad de los aceros de alta resistencia se aprovecha por completo.

Gatos, anclajes y cables en las primeras obras de hormigón pretensado.



carga sobre el cimiento que estaba cediendo hasta la seguridad de unos pilotes vecinos, el logro de su sistema corrió de boca en boca y su despegue era ya imparable. Hoy en la inmensa mayoría de obras importantes de hormigón es difícil dejar de encontrarse con cables, anclajes y gatos que descienden de los un día imaginados por Freyssinet.

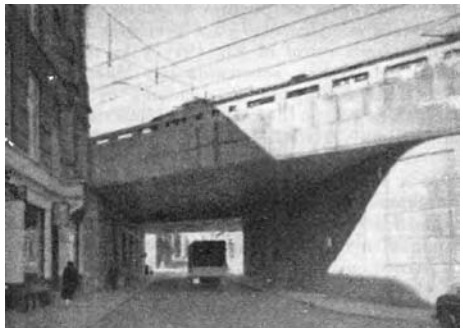
Pero el hormigón pretensado no sólo necesitaba aceros de alto límite elástico (con una tensión de rotura aproximadamente entre 4 y 5 veces superior a la de los aceros convencionales), sino que, de hecho, era la única vía para utilizarlos en las estructuras de hormigón. En las armaduras pasivas del hormigón armado convencional (llamadas así en contraposición a las armaduras activas con las que, en las piezas pretensadas, se aplica fuerza sobre el hormigón), el acero de alto límite elástico no puede ser aprovechado hasta los valores altos de tensión de los que es capaz, porque alcanzarlos requeriría a su vez valores de deformación en servicio que no son compatibles con una fisuración controlada del hormigón [2]. Así pues, aunque el objetivo primario del pretensado era eliminar fisuras y controlar deformaciones mediante la creación de un beneficioso estado tensional previo en la estructura, el incremento en la capacidad de carga que se derivó de usar para ello aceros de alto límite elástico fue, lógicamente, un "efecto secundario" de gran importancia.

Freyssinet construyó en los años 30 varios puentes carreteros con hormigón pretensado, pero la segunda guerra mundial supuso una brusca interrupción en la que tristemente el objetivo más habitual pasó a ser destruir puentes en lugar de construirlos. En Centroeuropa, donde la devastación fue mayor, las necesidades de reconstrucción tras la guerra, seguidas de un rápido crecimiento económico, produjeron un gran auge en la construcción de puentes al final de los años 40. Fue en estos años cuando realmente el hormigón pretensado se fue estableciendo. Las nuevas técnicas relacionadas con el pretensado se fueron contrastando y mejorando, y el diseño y análisis de las estructuras que lo empleaban se convirtió en unos de los más importantes campos de investigación en las escuelas de ingeniería de todo el mundo. Innumerables publicaciones y artículos de desigual fortuna vieron la luz en estos años, pero entre todas posiblemente la que se convertiría en la más conocida referencia para los ingenieros de la época es el libro Spannbeton für die Praxis, que publicó en 1945 el que sería una de las mayores figuras de la ingeniería en el siglo XX: Fritz Leonhardt.

El primer puente de ferrocarril en hormigón pretensado, Pont Miroir, en Bruselas, de 20 metros de luz.

Puente sobre el canal de Neckar en Heilbronn. Primer encargo de puente pretensado hecho por los Ferrocarriles Federales Alemanes. Procedimiento de Baur-Leonhardt.

Puente de ferrocarril sobre el río Eder, en Grifte. Procedimiento Dywidag.



De esta época es el puente de Miroir, posiblemente el primer puente pretensado para el ferrocarril, concluido tras la guerra en 1948 por otra de las figuras en los primeros días de esta nueva técnica, el belga G. Magnel. El puente era un paso superior a la salida de la estación central de Bruselas, y sus escasos 22 metros de luz revelan, junto a lo tardío de su construcción, que el ferrocarril iba una década larga por detrás de la vanguardia en la construcción de puentes que lideraban ya por completo los caminos de asfalto y no los de hierro. Las mucho menores cargas de los automóviles lógicamente se prestaban más a las innovaciones, y de hecho para este primer puente de ferrocarril se buscó un nivel más alto de seguridad, optando por realizar una gran viga como testigo para ensayarla a rotura; como explica el propio Leonhardt en su libro antes citado, esta prueba suministró valiosas aclaraciones acerca de la inyección, la adherencia y la seguridad a rotura en las estructuras pretensadas.

Al atravesar el ecuador del siglo ya se habían desarrollado varios sistemas de pretensado, todos en mayor o menor medida basados en el modelo de Freyssinet, y muchos de los cuales han derivado en algunas de las hoy mayores empresas de la construcción con pretensado. El sistema Dywidag, por ejemplo, que empleaba barras de alta resistencia (900 N/mm^2) inyectadas tras el tesado, pasó a utilizarse con gran frecuencia en Alemania de la mano de su inventor, Ulrich Finsterwalder, otro de los nombres con mayúsculas de la ingeniería del siglo recién terminado. Leonhardt y su compañero W. Baur desarrollaron y patentaron el sistema Leoba, que incorporaba tendones de pretensado que agrupaban cables de alta resistencia (ya 1.800 MPa) para concentrarlos en pocos conductos y tesarlos todos a la vez, en lo que es hoy la forma más habitual de trabajar. El éxito de los sistemas de Freyssinet y sus variantes alemanas despejo rápidamente cualquier duda que pudiera mantenerse con respecto al pretensado.

Fue el sistema de Leonhardt el que se usó en 1950 para construir el primer puente pretensado para el ferrocarril alemán sobre el canal del Neckar, y el mismo año se construiría el segundo, empleando el procedimiento de Dywidag, para salvar el río Eder en Grifte con 6 vanos con una luz máxima de 25 metros. Aunque todavía de luces limitadas, estos puentes alcanzaban ya una esbeltez que, habituados a los puentes de hormigón armado, muchos ingenieros del ferrocarril consideraron temeraria. Sin embargo el potencial del pretensado apenas estaba comenzando a exprimirse y sólo 5 años después el ferrocarril ya estaría viajando sobre vanos de hormigón cuya luz más que doblaba la de estos primeros ejemplos.

Coincidiendo con las primeras realizaciones con hormigón pretensado para el ferrocarril, se empezaba a introducir la idea del pretensado parcial, en contraposición con el pretensado total que propugnaba la filosofía de Freyssinet y que podía resultar en exceso restrictivo e innecesariamente costoso. Con el pretensado parcial se reduce el nivel de precompresión de la estructura, que queda a medio camino entre el hormigón armado y el pretensado, aceptando que el hormigón pueda estar sometido a tracciones y fisuraciones que se resisten y controlan con armadura pasiva que se suma a la activa. En los años 50 varios países relajaron las exigencias en cuanto al nivel de pretensado de sus códigos, y el concepto moderno del pretensado parcial se desarrolló definitivamente en la década de los años 60. La gran mayoría de las normas dejó de restringir las tracciones en el hormigón en servicio y la resistencia en rotura pasaba a calcularse considerando tanto la armadura de pretensado como lo armadura pasiva[3].

El creciente dominio de la nueva y prometedora técnica del hormigón pretensado fue liderado en estos primeros años, y en particular durante la década de los 50, por la ingeniería alemana, con Leonhardt y Finsterwalder a la cabeza, cuyas obras impulsaron una nueva generación de los puentes en hormigón. En este periodo tan fértil desde un punto de vista ingenieril nacieron casi todos los procesos constructivos que hoy todavía enmarcan la construcción de los actuales puentes de hormigón y que, en general, muestran con respecto a los de entonces importantes avances cuantitativos, pero pocos cualitativos. Los puentes de Leonhardt empezaron a emplear la construcción sucesiva de diferentes tramos del puente, permitiendo la reutilización de cimbras y encofrados. Las compañías de pretensado desarrollaron rápidamente acopladores para dar continuidad a los cables en juntas de construcción situadas en puntos intermedios del tablero, sentando las bases de lo que hoy llamamos construcción vano a vano de las vigas continuas.

Pero el verdadero salto en la luces llegaría, como antes había sucedido en las vigas metálicas, de la mano de los métodos que minimizaban los medios auxiliares necesarios durante la construcción y eliminaban así los importantes condicionantes técnicos y económicos que de ellos se derivaban, al tiempo que aumentaban la industrialización del proceso y permitían independizarlo del obstáculo que se salvaba. Así, el pretensado iba a hacer posible la construcción en voladizos sucesivos, que Finsterwalder sería el primero en llevar a la práctica con su sistema de barras dywidag, y que abrió el camino de las grandes luces para las vigas de hormigón. Éstas empezaron por tanto a competir con los arcos de hormigón a los que eventualmente acabarían desplazando.

[3] Era el primer paso hacia el concepto del hormigón estructural que actualmente engloba al hormigón armado y el pretensado, durante mucho tiempo confusamente diferenciados en la norma y la enseñanza pese a su análoga esencia.

Destacable por singular es por ejemplo el viaducto para el ferrocarril urbano de Nuremberg, obra de Finsterwalder, que fue el primero en emplear aletas dorsales. Estas formaban un doble voladizo empotrado en las pilas. El tablero, con luces máximas de 40 metros, se completaba con losas apoyadas en los voladizos.

Los avances en cimbras y encofrados que buscaban reducir y simplificar los medios auxiliares y la mano de obra siguieron produciéndose, y en los años 60, el también alemán Hans Wittfoht desarrolló por primera vez la construcción vano a vano con autocimbra. De esta década datan también los primeros puentes empujados impulsados inicialmente de nuevo por Leonhardt. Así pues, en menos de 15 años los ingenieros alemanes, empujados por la reconstrucción de un país que había sido arrasado, habían desarrollado prácticamente todos los métodos constructivos con los que hoy se levantan la inmensa mayoría de los grandes viaductos de hormigón pretensado. Es decir, la construcción vano a vano con cimbra o autocimbra, la construcción por voladizos sucesivos o la construcción por empuje del tablero.

El único procedimiento constructivo cuyo origen se sitúa en los países francófonos, Francia, Suiza y Bélgica, fue el de la construcción mediante vigas prefabricadas pretesas. Los primeros puentes pretensados de Freyssinet fueron pequeños pasos carreteros mediante vigas prefabricadas simplemente apoyadas, y sus conocidos puentes sobre el Marne de principios de los 40, también para carretera, usaron ya grandes dovelas prefabricadas. El primer puente para el tren con vigas pretesas posiblemente sea el pequeño puente para un desvío ferroviario que los suizos construyeron en 1944 en Friburgo, obra de A. Panchoud, casi al tiempo que en Bélgica se construía el primer puente de pretensado in-situ para el ferrocarril. Se trata pues de una tipología que se viene usando desde los primeros días del hormigón pretensado, aunque en un principio su aplicación se limitó en general a puentes de pequeñas luces. Estando evidentemente condicionada por la capacidad de los medios de transporte y montaje, su gran avance tendría que esperar al espectacular desarrollo de las grandes grúas. En cualquier caso se empleó desde un principio en muchos puentes, tanto carreteros como ferroviarios, siendo las redes de transporte italianas un claro ejemplo.

Puente de La Voulte sobre el Ródano (1955) e imagen durante su construcción por voladizos sucesivos.

Un repaso de la aplicación de todos estos procesos constructivos nacidos para el hormigón a mediados de siglo puede ser un adecuado camino para describir la evolución en la construcción de puentes pretensados desde entonces hasta nuestros días. Más allá de los primeros puentes construidos in situ sobre cimbra, el primer salto cualitativo hacia luces mayores llegaría con la construcción con voladizos sucesivos introducida por Finsterwalder y que de hecho sería el método que, como había sucedido con las celosías metálicas un siglo antes, llevaría a los mayores puentes viga de hormigón pretensado.

De la primera época del hormigón pretensado, sin embargo, el más conocido de este tipo de puentes para el ferrocarril no es alemán sino francés. El puente metálico que permitía el paso del tren sobre el Ródano había sido destruido durante la guerra, y en

1955 fue sustituido por el puente de La Voulte, que con sus 5 vanos de 60 metros de luz fue el mayor y más largo viaducto de ferrocarril en hormigón pretensado que se hubiese construido. En este puente se avanzó en voladizo simétricamente desde las pilas aporticadas, encofrando y hormigonado el tablero en fases sucesivas en las que se contaba con una viga metálica provisional para desplazar los carros de avance y proporcionar acceso a las pilas intermedias durante la construcción. Las pilas trianguladas quedan empotradas en el tablero logrando un efecto pórtico y un monolitismo que sin duda han contribuido al buen estado y comportamiento de esta estructura, que por otro lado necesitaría recurrir a una cierta flexibilidad de los cimientos para hacer frente a los desplazamientos por deformaciones impuestas de un tablero continuo de considerable longitud.

El aumento de las luces que el pretensado impulsaba llevó al resurgimiento de una tipología de vigas que había quedado prácticamente abandonada desde que Robert Stephenson la emplease por primera vez en el puente de Britannia un siglo antes. La viga en cajón se redescubrió tras la segunda guerra mundial para el hormigón pretensado como consecuencia lógica del progresivo aumento de luces. Como veremos, paralelamente también se retomó su uso en puentes metálicos. La sección en cajón optimiza el rendimiento del material y proporciona gran rigidez no sólo a flexión sino también a torsión. A partir de ciertas luces, y cantos, pasó a ser la más constructiva y eficiente sección transversal, imponiéndose por lo general frente a vigas o losas en cuanto la luz superaba el entorno de los 30 ó 40 metros.

Un claro ejemplo lo encontramos en España, donde en 1967 se construyó sobre el río Tajo el viaducto de Alconetar, para carretera y ferrocarril. Al reservar la losa superior del cajón para el paso de los coches, el ferrocarril salvó el río Tajo por un túnel en el aire como 100 años atrás lo había hecho sobre el estrecho de Menai con el Britannia. La luz central del viaducto de Alconetar fue de 85 metros, lo que en su momento supuso la mayor luz salvada por el hormigón en un puente de ferrocarril. Se construyó el mismo año y para la misma línea otro viaducto muy similar y con idéntica luz máxima sobre el embalse de Alcántara. La construcción de ambos, a cargo de la empresa alemana Dyckerhoff und Widmann, fue por voladizos sucesivos, único método válido entonces, y aún hoy, para vigas con luces de esta magnitud. Tuvo la singularidad de que, siendo un viaducto de varios vanos, no se partió de forma simétrica desde las pilas centrales sino desde ambos estribos. Esto obligaba a salvar en voladizo la luz completa de los vanos laterales, lo que aún siendo éstos considerablemente más cortos obligó a emplear para ello atirantamientos provisionales en el avance en voladizo, en una configuración análoga a la que se usa en los por entonces incipientes puentes atirantados de los que hablaremos más adelante.

Viaductos de Alconetar sobre el Tajo y de La Plata sobre el embalse de Alcántara, para carretera y ferrocarril. Construcción por voladizos sucesivos partiendo de un estribo y con un atirantamiento provisional (1967).

Viaducto de Vernegues (TGV) y viaducto de Sao Joao que desde 1991 soporta el paso de los trenes que durante más de 100 años habían cruzado sobre el puente de Maria Pía, al fondo de la imagen.

(pag. derecha) Construcción por voladizos sucesivos de los viaductos de Roquemaure y de Ventabren, en el TGV francés. El segundo se construyó paralelo a la autopista que debía salvar para ser luego rotado hasta su posición definitiva.

Una vez alcanzado el vano central, la viga avanzaba de forma convencional hasta el centro de la luz para unirse allí con la otra mitad del tablero que avanzaba en sentido contrario.

Desde que nació, la construcción por avance en voladizo ha posibilitado y monopolizado la construcción de los puentes viga de gran luz, y el que es en este momento el mayor viaducto de hormigón pretensado para ferrocarril no es una excepción. El puente de Sao Joao, en Oporto, tiene una longitud total de 1.029 metros a 66 metros de altura sobre el agua, con una luz central sobre el Duero de 250 metros que, desde que se construyó en 1991, no ha superado ningún puente de hormigón para el ferrocarril. Fue diseñado por Edgar Cardoso, con una elegante geometría y cuidado acabado, imprescindibles teniendo en cuenta su emplazamiento y el delicado pero estimulante compromiso de sustituir el centenario puente de Maria Pía de Eiffel, patrimonio de la ingeniería del siglo XIX y que hoy se mantiene junto a él, fuera ya de servicio.

En las líneas de alta velocidad algunos de los más conocidos puentes que han empleado la construcción por avance en voladizo fueron el viaducto de Vernegues o el de Ventabren, ambos para el TGV Meditarranée. La luz de 100 metros del segundo sobre la autopista se salvó en una construcción por voladizos sucesivos con la singularidad de que, para evitar problemas de gálibo y seguridad durante la construcción, el tablero se construyó en posición paralela a la autopista para ser luego llevado a su posición definitiva en una delicada operación de rotación sobre su apoyo.

En España el primer viaducto de las modernas líneas de alta velocidad que ha empleado el avance en voladizo ha sido el viaducto de Mocejano sobre el río Tajo, completado en el 2004 para la línea de alta velocidad entre Madrid y Toledo. Otro ejemplo es el viaducto del Guadalquivir en la LAV Córdoba-Málaga, con una luz de 80 metros. El avance por voladizos sucesivos es en cualquier caso un procedimiento que, estando reservado a las grandes luces, es bastante excepcional en los actuales puentes para el tren.

Pero conviene volver la vista atrás, a los inicios del hormigón pretensado, porque como hemos visto a la vez que Finsterwalder recuperaba la construcción en voladizos sucesivos para el hormigón, otros métodos de construcción se estaban también germinando conforme avanzaba la tecnología de los encofrados y se sofisticaban las cimbras. De la tradicional cimbra cuajada o cerrada, se pasó a la cimbra porticada o abierta en aquellos casos en los que había que salvar algún obstáculo inferior o en los que la elevada altura de la rasante aconsejaba la disposición de torres de cimbra aisladas y vigas portantes sobre ellas. No tardaría en pasarse a emplear las propias pilas ya construidas del viaducto como apoyo para las vigas de la cimbra, e igualmente se percibió lo ventajoso que resultaría vincular el encofrado al elemento portante de la cimbra y así evitar sus sucesivos montajes y desmontajes en cada fase de hormigonado. Cimbra y encofrado podrían trasladarse después de cada hormigonado hasta el siguiente, lo que, de forma natural, acabó derivando en la tecnología de las autocimbras, también llamadas cimbras autoportantes o autolanzables, cuya primera aplicación por el alemán Wittfoht, en puentes carreteros, data de principios de los 60. Este es uno de los procedimientos de construcción in situ con el que se alcanzan mayores niveles de automatización y que por lo tanto permite menores plazos de ejecución en las grandes obras.

La autocimbra consiste en una gran viga en celosía metálica que apoya provisionalmente sobre las propias pilas del viaducto y se sitúa por encima o por debajo del tablero. Esta viga sustenta su propio peso, el del encofrado y el peso del hormigón fresco durante la construcción, que pasa a independizarse del terreno y de los obstáculos a salvar. Tras el hormigonado de cada vano [4], la cimbra autoportante avanza al siguiente en un típico esquema de construcción vano a vano. La autocimbra incorpora mecanismos para un sencillo encofrado y desencofrado y sistemas para un rápido traslado de la viga que desde sus primeras aplicaciones han ido evolucionando y hoy permiten ritmos de construcción que llegan a ser de un vano a la semana.

El principal condicionante de este procedimiento es evidentemente la necesidad de contar con una gran viga capaz de salvar la misma luz que los vanos del puente soportando todo el peso del hormigón fresco. Esto limita las luces para las que es económicamente viable, que no suelen superar los 50 metros [5], y restringe su aplicación a puentes de longitud considerable en los que el número de vanos a construir sea suficiente para amortizar la inversión en un elemento auxiliar de tanta envergadura. Esto, sin embargo, sucede habitualmente sobre todo en el caso del ferrocarril, y la construcción con autocimbra es hoy frecuente.

[4] Cuando se trata como es habitual de tableros continuos en la fase de hormigonado de un vano se ejecuta también una parte del siguiente, que ronda el quinto de la luz, y que permite compensar los momentos en el dintel durante las distintas fases al tiempo que se evita situar las juntas de construcción en las críticas secciones sobre pilas. De ese modo también se reducen considerablemente los esfuerzos sobre la autocimbra en comparación con la ejecución por vanos isostáticos.

[5] Existen sin embargo notables excepciones, como la del viaducto sobre el río Averno de la LAV Mad-Bcn, con luces de 60 metros o el más reciente del Arroyo del Valle, en la LAV Mad-Valladolid, en el que la autocimbra salvó luces de 66 metros.

Viaducto del río Jévar (LAV Córdoba-Málaga).

Viaducto de Cornellá (Barcelona, 2005). La autocimbra superior puede hacerse necesaria cuando el viaducto cruza otras vías con gálibos ajustados.

Casi al mismo tiempo en que Wittfoht construía el primer viaducto con autocimbra, se construía en Austria el primer puente de hormigón ejecutado por empujes sucesivos, técnica que impulsaría Fritz Leonhardt a mediados de los años 60 y que es hoy una de las más empleadas para los grandes viaductos de ferrocarril.

El procedimiento de empuje en los puentes de hormigón es esencialmente análogo al de los puentes metálicos que tan profusamente se empleó en la segunda mitad del siglo XIX. El tablero se fabrica por fases siempre en el mismo lugar, que coincide con uno de sus estribos, para proceder tras cada fase a su empuje o lanzamiento, haciéndolo pasar por los sucesivos puntos de apoyo en las pilas ya construidas, hasta alcanzar su posición definitiva. Las ventajas de este método son análogas a las que proporcionaba el uso de la autocimbra, al independizar del terreno la construcción del tablero, permitir la eficaz reutilización de los medios auxiliares y, ante todo, facilitar la sistematización y control del proceso de ejecución que se concentra en uno de los estribos. La industrialización de la construcción redunda, en definitiva, en altos rendimientos, mejor control de calidad y mayor seguridad. Las soluciones empujadas llevan el rango de luces algo más lejos que en el caso de la autocimbra, con numerosas realizaciones con vanos en el entorno de los 60 metros, como la del viaducto de Huerva en la LAV Madrid - Barcelona cuya luz máxima y longitud total, de 66 y 1.122 metros respectivamente, son de las mayores que se hayan alcanzado de esta tipología [6].

[6] En el viaducto del río Cinca (LAV Madrid-Barcelona) se empujaron vanos de 70 metros, aunque el récord para este sistema constructivo en viaductos de hormigón se alcanzará en el viaducto del Istmo (LAV Madrid-Castilla la Mancha) con luces de 90 metros.

El proceso de empuje requiere habilitar en uno de los estribos todo un parque de fabricación, que es la zona de hormigonado donde se construyen las dovelas que posteriormente se empujan. Es un elemento clave en el proceso constructivo que debe salvar dos condicionantes fundamentales: por un lado debe lógicamente situarse en prolongación de la directriz del tablero, y por otro lado debe ser de importante longitud (de entre 1 y 2 veces la luz del vano), entre otras cosas para que en el momento de volar el primer vano exista suficiente contrapeso para asegurar la estabilidad frente al vuelco del tablero mientras éste no alcance la primera pila. El amplio espacio que por ello requiere el parque de fabricación, sobre todo si la alineación del trazado en la aproximación al puente difiere sensiblemente de la del propio viaducto, puede llegar a restringir la aplicabilidad de este procedimiento, en particular cuando involucra consideraciones medioambientales. En cualquier caso, se trata de un elemento provisional de suficiente envergadura como para que, unido al otro gran medio auxiliar que es la nariz o punta de avance, haga del empuje un procedimiento sólo rentable para viaductos de longitud considerable, por encima de los 500 ó 600 metros.

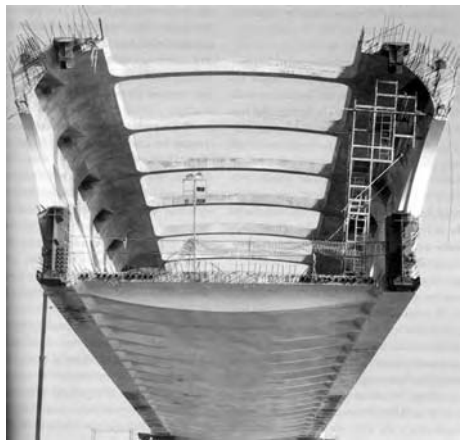
Vista aérea de un viaducto ferroviario en proceso de empuje y del parque de fabricación con la ferralla de la siguiente dovela ya preparada.

Viaducto empujado en las líneas del AVE.
Viaducto en el tramo Ricla-Calatayud.
Doble viaducto sobre el río Huerva.

(derecha) Viaducto de La Grenette (TGV

Otra limitación de la construcción por empuje proviene de la propia geometría del tablero, que para poder subdividirse en dovelas exactamente iguales debe ser recto o de curvatura constante, tanto en planta como en alzado. No obstante, es posible recurrir a una construcción por empuje, aunque el eje de trazado sobre el viaducto no tenga una geometría "empujable" cuando, como suele ser el caso del ferrocarril, el trazado es suficientemente suave. En este caso pueden asumirse ciertas excentricidades entre el eje de trazado y el del tablero, o realizar ajustes de la rasante con recrecidos o mediante el balasto. Si el acuerdo en alzado es suficientemente próximo a una circunferencia puede incluso construirse el tablero con alzado de radio constante para que luego se deforme adaptándose a la posición de las cabezas de pila que sí siguen el trazado exacto; los radios son en general suficientemente amplios como para que los esfuerzos que esta deformación impuesta genera resulten perfectamente asumibles. También resulta un factor muy influyente la pendiente del viaducto, que puede requerir, si es ascendente, mucho mayores fuerzas de empuje, o elementos de retención en caso contrario; este es en cualquier caso un condicionante que, de nuevo, suele verse muy suavizado por las generosas características de trazado del ferrocarril.

Pero el mayor condicionante de la construcción por empujes sucesivos es, al fin y al cabo, tener que salvar en voladizo, durante el lanzamiento, la luz completa de los sucesivos vanos del viaducto. Además, cada sección del tablero se convierte en algún momento en la sección de apoyo y queda por tanto sometida a importantes cargas localizadas. Los esfuerzos de lanzamiento son, en definitiva, muy importantes y no en pocos casos dimensionan el tablero. Todo ello resulta todavía más crítico en los tableros de hormigón si se comparan con los de celosía metálica que se venían construyendo por empuje desde mediados del siglo XIX, pues las soluciones de hormigón tienen un mucho mayor peso propio que resistir durante la construcción mientras el tablero alcanza su posición definitiva.



Viaducto del Ebro. Vista de la sección transversal durante la construcción.

Por ello la práctica totalidad de los viaductos empujados de hormigón emplean secciones en cajón unicelular, que son las que consiguen un mayor rendimiento del material o, dicho de otro modo, las que a igualdad de peso propio alcanzan mayor capacidad y rigidez, así como una mejor eficacia del pretensado. Es una sección que, además, trabaja bien tanto a flexión negativa como positiva, pudiendo adaptarse a los esfuerzos alternos a los que cada sección se ve sometida durante el empuje; como hemos visto, viene empleándose desde que, merced al pretensado, el hormigón empezó a enfrentarse a luces de cierta importancia, pero no debe considerarse un tipo de sección estancado, pues ha evolucionado en la medida en que lo han hecho la capacidad resistente y las características de trabajabilidad del hormigón que la forma, lo que ha ido resultando en secciones cada vez más ligeras que previsiblemente llegarán a aligerarse más en el futuro en lo que es el camino para alcanzar luces cada vez mayores con este procedimiento constructivo.

Posiblemente el ejemplo más claro de cómo en efecto la innovación estructural tiene cabida incluso entre unos puentes tan optimizados es el espléndido viaducto con el que la línea de alta velocidad entre Madrid y Barcelona salva el Ebro. Con una original pero eficaz sección en cajón abierto, con grandes huecos circulares en sus almas y una losa superior que se elimina en gran parte para ser sustituida por una transparente sucesión de costillas transversales, los 120 metros de luz de este puente han llevado los puentes en cajón de hormigón pretensado construidos por empuje un paso más allá. En realidad, como es preceptivo dada su luz, en este puente se conjugaron los principios constructivos del empuje y de la construcción por voladizo, pues para salvar el vano central cada mitad del puente se empujó desde un extremo y se unió a la otra mitad en el centro de la luz principal, de forma análoga a como se hace en la construcción por voladizos sucesivos, con el hormigonado de una dovela de cierre de 6 metros en mitad del vano central.

Esta innovadora solución viene a adaptar el concepto de las celosías metálicas de tantos grandes puentes ferroviarios al dominio estructural y constructivo del hormigón pretensado. El aligeramiento del alma es lógicamente menor que el que supone el empleo de una celosía, pero está más adaptado a un material, el hormigón, que se construye por vertido y no montando elementos lineales como forzosamente ocurre con el acero. El canto total es de 9.15 metros y los aligeramientos espaciados cada seis metros tienen un diámetro de 3.80 metros y resultan en un comportamiento estructural del alma, marcadamente tridimensional, que es en cierto modo análogo al de una viga Vierendeel. Como con el Britannia, el tren vuelve a sobrevolar las aguas dentro de un cajón, pero ya no dentro de un túnel.

Viaducto del Ebro durante el proceso de empuje desde ambos estribos (LAV Madrid-Barcelona).

El que el proceso de construcción pueda condicionar significativamente el diseño del tablero, es una problemática de los puentes empujados que en los puentes de ferrocarril puede mitigarse significativamente por lo elevado de sus cargas de diseño, lo que es sin duda uno de los motivos principales por lo que este procedimiento de construcción ha resultado con frecuencia el más competitivo para los viaductos ferroviarios. En efecto, en la medida en que las sobrecargas y cargas muertas de diseño, que no están presentes durante la construcción, son mayores, mayor es el margen con el que cuenta el tablero para enfrentarse a esquemas estáticos durante el lanzamiento más desfavorables que los de su situación definitiva. Así, en puentes de ferrocarril se mitiga el sobredimensionamiento del tablero derivado de los esfuerzos durante construcción, al menos en los vanos más alejados de la punta de lanzamiento y, por lo tanto, menos influidos por el voladizo de avance.

Como vimos, desde los primeros puentes empujados metálicos se han buscado diferentes vías para reducir los importantes esfuerzos en el vano delantero que debe trabajar en voladizo. Los mismos que se emplearon para los viaductos de celosía desde mediados del s. XIX se han empleado un siglo después para los viaductos de hormigón, desde construir pilas provisionales para partir la luz hasta atirantar el vano de avance con un mástil provisional sobre el tablero. La primera opción puede resultar muy costosa, y la segunda exige un riguroso y complejo control de la reacción en la

base del mástil, que puede provocar situaciones pésimas imprevistas y que ha sido causa de importantes accidentes. Por ello, el procedimiento que hoy se ha impuesto es el del pescante o nariz, como se conoce a la viga metálica ligera, o al menos más ligera el propio tablero, que se acopla provisionalmente a la punta de avance y permite, en cada fase, alcanzar la siguiente pila con esfuerzos sobre el hormigón mucho menores. La longitud de la nariz se sitúa entre el 50 y el 60 % de la luz del vano, y la flecha en el su extremo puede ser de varios decímetros, desplazamiento que debe recuperarse, generalmente mediante gatos, cada vez que la nariz alcanza una nueva pila.

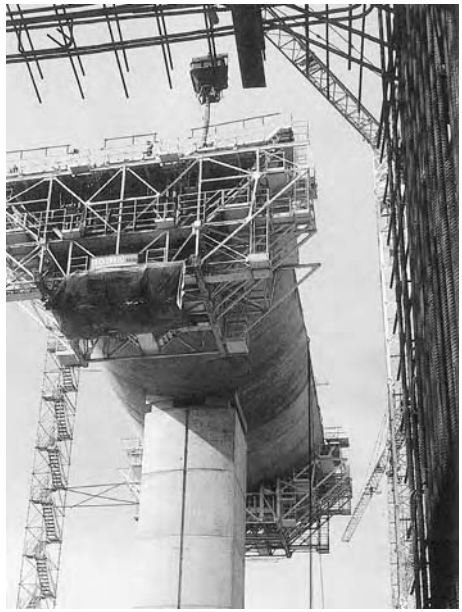
Vista del pescante o nariz empleado durante el empuje del viaducto de La Grenette.

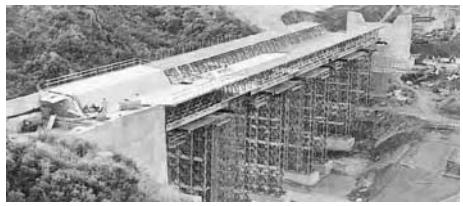
Aún siendo un procedimiento cuya esencia no se ha modificado desde sus inicios, la gran experiencia acumulada unida a la evolución continua en los medios auxiliares y en las variantes de los medios de deslizamientos mantienen una progresión permanente que redunda en una mejora de rendimientos y en una cada vez mayor envergadura de los puentes que se llegan a ejecutar con este procedimiento o, desde otro punto de vista, las cada vez menores longitudes de viaducto para las que resulta económicamente competitivo. Hoy el empuje suele realizarse mediante gatos hidráulicos con los que se eleva y empuja directamente el tablero en ciclos repetitivos que permiten ir recuperando en cada fase la carrera de los gatos, aunque se han empleado y se mantienen otros varios sistemas, como los basados en cables o barras.

Para el deslizamiento del tablero sobre las pilas lo más habitual actualmente es emplear apoyos terminados en una chapa de acero inoxidable, sobre la que durante el lanzamiento se van introduciendo, una detrás de otra, almohadillas de neopreno por la cara superior, para rozar con el tablero, y teflón por la cara inferior, para deslizar sobre la chapa de acero inoxidable. Existen sin embargo otros varios sistemas posibles, que siempre buscan minimizar el rozamiento entre apoyo y tablero y garantizar que no se produzca ninguna anomalía en alguno de los apoyos que pueda multiplicar la fuerza en alguna pila durante el empuje e incluso provocar su rotura; este es uno de los mayores riesgos de este procedimiento que como hemos visto ya proporcionó no pocos quebraderos de cabeza al mismo Eiffel y sus contemporáneos iniciadores del empuje de tableros. Actualmente es habitual instrumentar el proceso y contar con sistemas automatizados que frenan el avance ante cualquier dispersión con respecto a los valores previstos.

Así pues, y resumiendo, la construcción in situ de viaductos de hormigón pretensado emplea hoy, con mayor o menor grado de sofisticación, procedimientos análogos a los desarrollados hace casi medio siglo en el periodo inicial de estas estructuras. Los voladizos sucesivos prácticamente monopolizan la construcción de los puentes de grandes luces, por encima de los 70-80 metros, que acostumbran a exigir tableros de canto variable y son, por otro lado, contados. La construcción con autocimbra o por empuje se aplica generalmente en viaductos largos con luces entre 30 y 60 metros, rango que abarca los casos más habituales en viaductos de ferrocarril. Como hemos visto ambos procedimientos se adecuan bien a los viaductos de ferrocarril y compiten entre sí. La autocimbra no suele ser competitiva por encima de los 50 metros, pero puede permitir mayor libertad de geometrías o de vinculaciones del tablero a la subestructura, y aunque lo habitual es emplearla para las más comunes secciones en cajón de canto constante, también con ella se construyen tableros de canto variable o con diferente sección transversal. Alcanza ritmos de construcción de un vano por semana. El empuje lleva hoy en día su rango competitivo de luces algo más lejos situándolo por encima incluso de los 60 metros, pero en cambio exige de forma generalizada una sección en cajón de canto inevitablemente constante, y difícilmente alcanza los ritmos de ejecución que llega a permitir la autocimbra. En el caso de los puentes del tren, la suavidad de los trazados y la menor relación entre peso propio y cargas totales mitigan como se ha comentado dos de los mayores condicionantes de la construcción por empuje.

Ejemplos de los tres principales métodos de construcción in-situ de puentes de hormigón más allá de la cimbra tradicional: El empuje, los voladizos sucesivos y la autocimbra (dcha.).





Construcción con cimbra: Puente del Arroyo Higuerones (LAV Córdoba-Málaga), Puente cajón sobre el río Aare (línea Olten-Bern, Suiza, 1979) y Puente de Altea (línea Alicante-Denia, 2005).

Una vez consolidados estos procesos de construcción semi-industrializada e independiente del terreno, la cara construcción con cimbra tradicional ha quedado generalmente restringida a puentes de luces pequeñas o moderadas y con reducida altura de rasante, inferior en general a los 20 metros. Exige un terreno con capacidad portante suficiente y riesgo de posibles avenidas controlado. En puentes cortos es habitual cimbrar todo el tablero, pero a partir de longitudes por encima de los 100-150 metros (3 a 5 vanos) suele ser conveniente pasar a una construcción por fases, vano a vano. De ese modo, además, se evitan grandes distancias entre anclajes de los cables, que si son muy largos pueden sufrir pérdidas excesivas en la fuerza de pretensado. En el caso de ejecución por tramos, resulta necesario disponer de dos juegos completos de encofrado y hasta 3 juegos de cimbra si se quieren obtener rendimientos aceptables. Su aplicación hoy suele limitarse a puentes tipo losa que, en función de su luz, puede ser armada o pretensada y maciza o aligerada.

Aunque se ha empleado esporádicamente en puentes cortos de luz importante o con sección en cajón, la construcción con cimbra suele usarse sobre todo en puentes tipo losa que, en función de su luz ser maciza o aligerada y de hormigón armado o pretensado. Las cimbras, por otro lado, son el sistema constructivo que permite mayor libertad a la hora de adoptar geometrías menos convencionales. Con cimbra, por ejemplo se ha ejecutado el viaducto de Altea, que emplea una configuración con aleta dorsal de gran sentido estructural y adecuado encaje funcional para el ferrocarril, pero que sin embargo ha tenido contadas aplicaciones desde que Finsterwalder la empleara por primera vez en el ferrocarril urbano de Nuremberg a finales de los años 60.

La otra gran vía de construcción de puentes de hormigón, alternativa a la construcción in situ, es la prefabricación, que como hemos visto se ha empleado desde los primeros días de los puentes pretensados. La prefabricación, de hecho, ha venido compartiendo los procedimientos sistematizados para la construcción in situ ya descritos, en soluciones análogas que vienen a sustituir las sucesivas fases de hormigonado por el montaje de dovelas prefabricadas.

Así, en la construcción por voladizos sucesivos cabe sustituir el carro de avance que sustentaría los encofrados por una viga auxiliar de lanzamiento que permite ir situando cortas dovelas prefabricadas que se solidarizan entre sí con un pretensado de continuidad, generalmente mediante barras. Con el empuje sucede lo mismo y, de hecho, muchas de las primeras realizaciones emplearon dovelas cortas prefabricadas, aunque hoy se ha consolidado el uso de dovelas largas hormigonadas in-situ. Al fin y al cabo la zona de hormigonado puede considerarse como un parque de prefabricación con las correspondientes ventajas asociadas y en el que, no siendo necesario el transporte de

Construcción con autocimbra y dovelas prefabricadas en el viaducto de Ma On Shan sustentadas provisionalmente por una viga de lanzamiento (China).

Vanos completos prefabricados en desmenuzados viaductos de alta velocidad en Italia, Taiwan y China.

(derecha) Construcción por voladizos sucesivos empleando dovelas prefabricadas en el viaducto de Avignon (TGV).

las dovelas, es preferible por diversos motivos hormigonar piezas de mayor tamaño, del orden de la mitad de la luz del vano.

Igualmente se han empleado y se emplean autocimbras que en lugar de soportar el peso de los encofrados y el hormigón fresco sustentan todas las dovelas prefabricadas que conforman un vano, que se colocan y unen mediante pretensado en una construcción por tramos análoga a la seguida en las obras in situ. En puentes cortos, y conforme los medios auxiliares de elevación y montaje han progresado, esta solución ha evolucionado hasta puentes en los que una viga de lanzamiento coloca no ya dovelas sino completos vanos prefabricados biapoyados, construyendo el puente a modo de un enorme mecano formado por grandes piezas independientes, lo que puede ofrecer ventajas desde el punto de vista del rendimiento y economía de construcción, pero también supone en general renunciar a unas muy deseables condiciones de continuidad y monolitismo estructural.

Estas soluciones podrían considerarse un modo de culminación tanto de los procesos de construcción por dovelas como de los que emplean vigas prefabricadas. Es esta segunda tipología la que por supuesto ha resultado más prolífica en la construcción de puentes prefabricados. Tableros conformados por tradicionales vigas pretesas biapoyadas se vienen empleando desde mediados de siglo y, conforme se han desarrollado adecuadamente los procedimientos de montaje (grúas, vigas de lanzamiento, etc.), se han convertido en una de las tipologías más universales para construir puentes de luz

Puente de vigas prefabricadas en doble "T" en la línea del AVE a Ciudad Real.

Tableros con doble viga artesa en la LAV Madrid-Barcelona.

moderada. Sin embargo, se han empleado mucho más para la carretera, con luces que alcanzan los 50 metros o incluso más, que para el ferrocarril, para el que su rango competitivo de luces no suele superar los 30 metros.

La forma más tradicional de estos puentes, mediante vigas en doble "T" que se montan directamente entre dos pilas separadas cada 3 ó 4 metros, se ha empleado con profusión por ejemplo en la primera línea española de alta velocidad entre Madrid y Sevilla, pero se ha visto en general desplazada hoy en día, en el caso de los viaductos de ferrocarril, por las soluciones con vigas "artesa", mucho más capaces, pero también más pesadas y por lo tanto ligadas a medios de montaje cada vez más poderosos. La losa superior se hormigona in situ sobre la artesa generando secciones cerradas en una solución visualmente más atractiva (o menos "desatractiva") que la de vigas y también más adecuada desde un punto de vista estructural por la rigidez a torsión que de ese modo se logra. Reproducir la sección en cajón unicelular de los viaductos ejecutados in-situ, sin embargo, llevaría a piezas de demasiado peso y tamaño para su eficaz transporte y montaje. Como veíamos este tipo de piezas, que más que vigas son tableros completos, sí se ha llegado a prefabricar, pero se trata en cualquier caso de soluciones excepcionales, que requieren plantas de prefabricación adhoc en cada obra y se escapan del ámbito de la prefabricación convencional para puentes en la medida en que, por ejemplo, no pasan por el transporte a obra de las piezas.

Por ello, la forma más habitual de emplear las "artesas" en el caso del ferrocarril ha sido mediante dos de estas vigas para un puente de doble vía, situadas muy próximas para que cada una quede sensiblemente bajo cada una de las vías. Para los puentes de ferrocarril, cuya anchura típica no supera los 14 metros, el emplear dos vigas principales tiene sin embargo menos sentido que en los anchos puentes carreteros, obligando a menudo a desdoblar las pilas pese a lo estrecho del tablero. Las vigas artesas, en este tipo de convencionales configuraciones biapoyadas y desdobladas, incrementaron el rango de las luces competitivas de los puentes prefabricados de ferrocarril hasta los 35 ó 40 metros, y proporcionaron soluciones de mayor interés visual y eficacia estructural que la de las tradicionales vigas en doble T, aunque sin alcanzar en general a la del único y mayor cajón de los puentes in-situ.

Se han desarrollado después, y en particular para puentes de ferrocarril, eficaces soluciones que pasan a adosar las dos vigas artesas cuya alma interior pasa a ser vertical de modo que, al menos desde un punto de vista visual, pasan a conformar un único cajón bicelular que lleva a una sección transversal del tablero muy similar a la optimizada y empleada en las construcciones in situ, con la ventaja añadida de que con la prefabricación es posible en general emplear hormigones de más calidad y con menores espesores, lo que permite reducir el peso propio del tablero y con frecuencia mejorar los

Vigas artesas de un tablero prefabricado hiperestático, con algunos de los torones del postesado de continuidad entre vigas ya enfilados.

Vista inferior de un tablero de vigas artesas adosadas en construcción.

acabados. Frente a estas y otras ventajas, la prefabricación ha arrastrado tradicionalmente el lastre de su habitual renuncia al monolitismo e hiperestatismo estructural, lo que en particular con los puentes de ferrocarril podía suponer una significativa desventaja estructural.

Sin embargo, el gran progreso de los métodos de unión entre piezas prefabricadas ha hecho posible también la ejecución de diversas tipologías de puentes prefabricados hiperestáticos, con eficaces dinteles contínuos que frente a las cargas en servicio se comportan de forma análoga a los tableros ejecutados "in situ" y cuyo reto fundamental es el de resolver de forma fiable y constructiva la conexión longitudinal entre elementos prefabricados. Para ello se emplean sistemas generalmente basados en el postesado o en el aprovechamiento de las posibilidades de unas resinas epoxídicas y morteros tipo grout en continua progresión. La sección de unión puede situarse sobre pila, lo que ofrece ventajas constructivas obvias pero resulta estructuralmente desfavorable por coincidir la crítica sección de unión con el punto de esfuerzos maximos en el tablero. La otra opción es buscar una sección que, al contrario que la situada sobre pilas, ofrezca esfuerzos mínimos y que suele situarse entre un cuarto o un quinto de la luz. Esta es la alternativa más habitual hoy en tableros continuos prefabricados de ferrocarril, pues aunque exige más medios auxiliares resulta mucho más eficaz desde un punto de vista estructural; en este caso el tablero suele subdividirse en dos tipos de vigas, cada una de longitud en torno a la mitad de vano. El primer tipo de viga se sitúa sobre las pilas apoyado también en un castillete provisional durante la construcción, y el segundo tipo actúa como tramo intermedio entre las vigas sobre pilas, en un sistema de construcción asimilable al de los puentes "cantilever". Este tipo de tablero emplea con generalidad las vigas artesa, especialmente adecuadas tanto desde un punto de vista estructural como desde un punto de vista constructivo, pues facilitan en gran medida el trabajo en el interior de las mismas de cara a la ejecución de las uniones.

Se trata ya de soluciones que desde la distancia cuesta diferenciar de los tableros in-situ y que en muchos casos alcanzan análogo nivel de integración visual y eficacia estructural. Son por otro lado obras en las que se sacrifica en cierta medida la ventajosa sencillez y rapidez de montaje de las más simples soluciones biapoyadas y que, en consecuencia, ven hasta cierto punto mermada la gran competitividad en economía y plazo que las soluciones prefabricadas suelen ofrecer frente a la construcción in-situ. Estas soluciones con tablero prefabricado pero hiperestático se han empleado en numerosas ocasiones con luces de 40 metros y cubren por tanto un rango de luces habituales en los actuales puentes ferroviarios. Su posible aplicabilidad para luces mayores está lógicamente coartada por el canto máximo que pueden tener las vigas "artesa" por las limitaciones del transporte. En este sentido, uno de los más recientes desarrollos en los

puentes prefabricados para ferrocarril busca lograr un mayor canto estructural para el tablero mediante un sofisticado sistema de prelosas realzadas y semi-prefabricadas que permiten, manteniendo el canto de las artesas en una dimensión transportable, aumentar el canto total del tablero y atacar así luces mayores. El puente de Vall de Membra en la línea de alta velocidad entre Madrid y Valencia, ha empleado este sistema para ganar un metro de altura del tablero sobre las "artesas" y alcanzar sobre pila un canto de 4 metros que ha posibilitado salvar una luz de 60 metros que supone un récord para los tableros prefabricados de ferrocarril.

Con una luz de casi 50 metros también ha superado las luces convencionales la singular solución prefabricada empleada en la línea entre Sevilla y Cadiz para los vanos mayores del viaducto sobre el río Guadalete, en los que sendos semiarcos prefabricados dan apoyo a las vigas artesas con las que se solidarizan, configurando una eficaz y elegante estructura aporticada. Obras como estas son muestra de las grandes posibilidades que, también para los puentes de ferrocarril, puede ofrecer la prefabricación, que concentra todas las ventajas de una construcción altamente industrializada y una sola condición para justificar su competitividad: un número suficiente de piezas iguales para permitir la amortización de una importante inversión inicial en plantas y moldes.

Construcción del puente de Vall de Membra con prelosas realzadas (LAV Madrid-Valencia).

Construcción de las arcadas prefabricadas del viaducto sobre el río Guadalete (línea Sevilla-Cádiz).

Su aplicación más habitual suele limitarse en cualquier caso a los viaductos con altura de pilas baja o moderada, por debajo en general de los 30 metros, y a puentes de longitud reducida o media, en los que no se justifican medios industrializados de construcción in-situ cuyo coste sólo se amortiza en tableros de gran longitud. Aunque ejemplos como el anterior, con más de 3 kilómetros de longitud total, o como los viaductos del Anguera, en la LAV Madrid-Barcelona, con longitudes cercanas al kilometro, muestran como más excepcionalmente la prefabricación puede llegar a ser también competitiva para las grandes longitudes, en particular cuando las alturas son bajas y el acceso para las piezas y los medios de montaje sencillo.

Un repaso por los diferentes métodos constructivos empleados ha servido en el presente capítulo para conocer las tipologías más habituales para los actuales puentes viga de hormigón pretensado que hoy copan la construcción de nuevos puentes para el ferrocarril. Los criterios y condicionantes específicos en el diseño de este tipo de puentes son objeto del siguiente capítulo, si bien antes de adentrarnos en ellos conviene no dejar de repasar el papel que el acero, como rey destronado, pero rey al fin y al cabo, ha desempeñado en los puentes del tren de nuestra época.

Puente del Pecos (Texas & New Orleans Railroad, 1944). Entramado inferior metálico solidario con las vigas cajón que sustentan las vías en el viaducto de Castrejana (FEVE Santander-Bilbao, 1984). Ampliación del paso ferroviario de múltiples vías sobre el río Elba (Alemania, 1992).

3. 4 El acero en el siglo XX

Si bien con el progreso de los grandes arcos y sobre todo con el desarrollo del pretensado en la segunda mitad de siglo el hormigón fue progresivamente robando protagonismo a los puentes metálicos y es hoy, particularmente en España, el material empleado para la gran mayoría de puentes para el tren, también el acero ha seguido ofreciendo excelentes soluciones de muy diversas tipologías. Dos aspectos en particular han jugado en ello un papel clave: en primer lugar, la consolidación en la 2ª mitad de siglo de las técnicas de soldadura que, como tantas otras, se vieron obligadas a progresar aceleradamente en tiempos de guerra y supusieron un salto cualitativo en la construcción con acero; en segundo lugar, el desarrollo de la construcción mixta en el último cuarto de siglo, que pasó a emplear conjuntamente el hormigón y el acero estructural, sacando inteligente provecho de las ventajosas cualidades de cada uno y poniendo fin a la tradicional dicotomía entre ambos materiales.

En la primera mitad de siglo las celosías puramente metálicas se siguieron por supuesto empleando con algunas grandes realizaciones como la del puente sobre del río Pecos, de 1944, que fue uno de los últimos grandes puentes del ferrocarril norteamericano.

Actualmente, sin embargo, apenas existen puentes de ferrocarril cuya superficie de apoyo para las vías no este materializada por una losa de hormigón, que ofrece la necesaria plataforma a la vez que colabora en la función resistente del puente; su continuidad y capacidad de trabajar en dos direcciones, unidas a su economía y sencillez constructiva, son ventajas hoy irrenunciables frente a las soluciones discontinuas para el sustento de la vía más o menos similares a las empleadas antes de la aparición del hormigón. Existen valiosas excepciones como puede ser la del puente de Castrejana que empleó un singular entramado inferior en celosía para dar apoyo a los carriles, pero en general los puentes para el tren puramente metálicos son hoy excepcionales, y lo más habitual es que las soluciones con estructura de acero se conviertan en construcciones mixtas al asociarse de uno u otro modo con el hormigón a la hora de proporcionar una superficie de apoyo a la vía.

A partir de la segunda guerra mundial, un siglo después del puente del Britannia, las soluciones metálicas de alma llena empezaron a tomar ventaja sobre las vigas trianguladas como consecuencia sobre todo de la consolidación de la soldadura, pero también por las mejoras en la fabricación de las chapas y por el progreso en el entendimiento y control de los fenómenos de inestabilidad local de la chapa o abolladura.

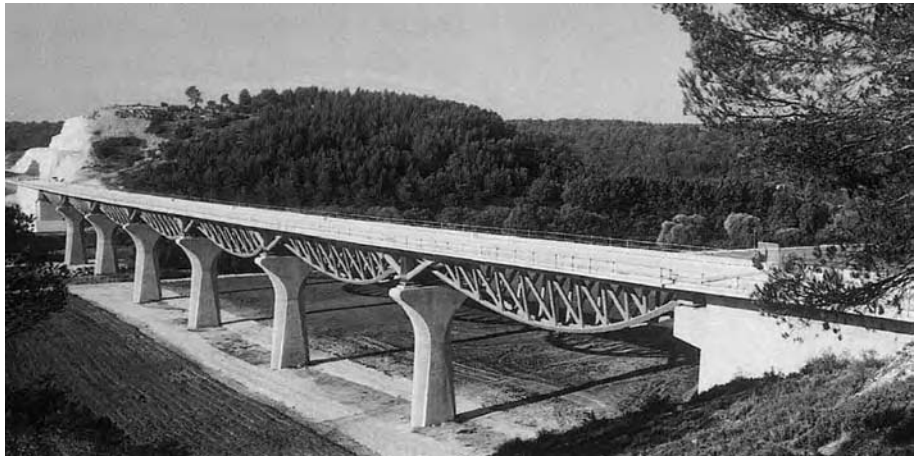
Celosía del puente del Centenario en el acceso de vía única al Monasterio de Montserrat. (2003).

Puente de Maxau sobre el Rin (Alemania, 1994).

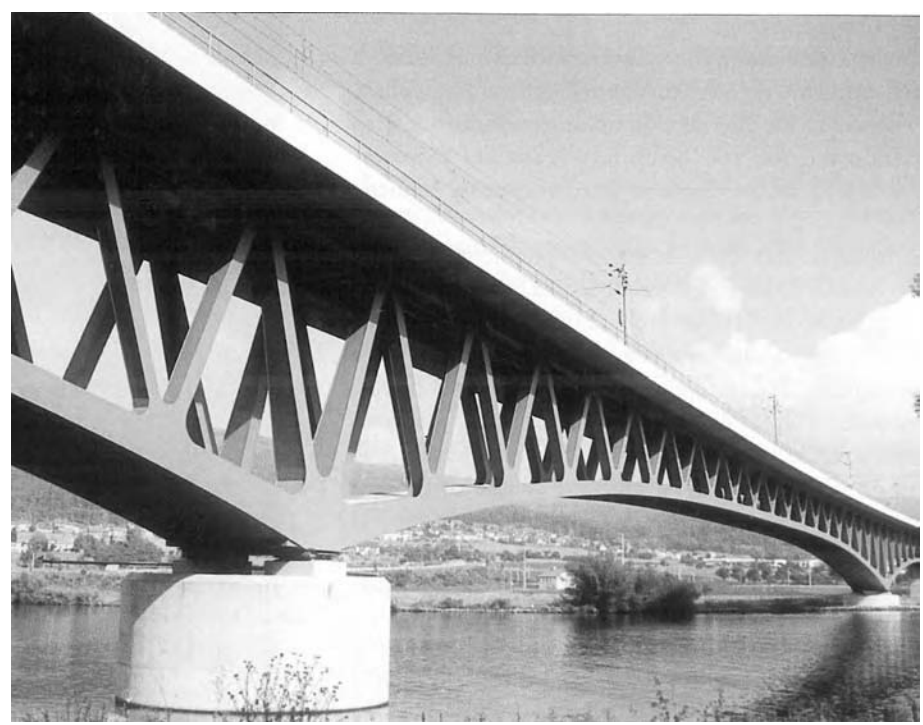
(derecha) Viaducto de l'Arc (Francia, 1997).

En cualquier caso, la celosía metálica, símbolo como hemos visto de la edad de oro del ferrocarril y cómplice indispensable en su época de máxima expansión, nunca ha dejado de tener cabida en las construcciones modernas para el tren. Tocada de un ápice de singularidad frente a la proliferación de puentes de hormigón, las celosías de acero han ofrecido soluciones contemporáneas de gran limpieza y elegancia formal, lo que puede justificar su uso más allá de la pura competitividad económica de la tipología. Su rango de aplicación se centra en las luces moderadas y grandes, normalmente en soluciones mixtas que buscan la máxima sencillez y transparencia, siendo por ello la celosía tipo Warren la más empleada.

Así, la tendencia es a usar las celosías con elementos mayores y más capaces pero en menor número, prescindiendo de barras secundarias o de arriostramiento y recurriendo generalmente a perfiles de sección cerrada. Los nudos rígidos, que se imponen definitivamente con el desarrollo de la soldadura, reducen el riesgo de pandeo en los elementos comprimidos, pero por otro lado suponen quizás la parte más compleja y costosa de la obra, siendo su adecuada concepción y detalle una de las claves de este tipo de estructuras. Las soluciones más abiertas mediante grandes barras en reducido número, por tanto, no sólo pueden ser más acertadas visualmente, sino que permiten una mayor eficacia, sencillez y economía de construcción en la medida en que resultan en un menor número de nudos. Ello es también reflejo de un momento en el que la mano de obra, cuya labor se concentra en las uniones, ha pasado a suponer un mucho mayor coste en relación con el de los materiales, invirtiendo así la situación de épocas pasadas.



La introducción de la celosía metálica mixta, con mucho la más habitual actualmente, se produjo en Alemania en los años 80 con los primeros pasos de su red de alta velocidad y hoy, pese a que el hormigón casi monopoliza los puentes para el ICE alemán, la administración germana cuenta entre sus soluciones tipo recomendadas para luces de 40 metros con varias celosías. Algunas de las realizaciones más destacadas con las del puente de Nesenback (1985), el del río Isar en Grossehesselohe (1986), el puente del Neckar o el de Kragenhöfer (1987). Pero entre ellos y todos los puentes contemporáneos, generalmente mixtos, que han empleado la celosía metálica, sin duda uno de los más notables es el puente de Nautenbach construido en 1994 sobre el río Main para la línea de alta velocidad entre Hannover y Würzburg, con proyecto de Leonhardt, Andrä und Partner. Los 208 metros de luz que salva con un canto máximo en apoyos de 15.60 metros fueron en su día la mayor luz de un puente mixto con celosía metálica, ya sea de ferrocarril o carretera, sin que quien esto escribe tenga constancia de que se hayan superado.



Puente de Nautenbach sobre el Main (LAV Hannover-Würzburg, 1994).

Cajón mixto del puente de Latah Creek (Burlington Northern Railroad, 1972).

Viaducto bijáceno de Tramery (TGV Mediterranée).

Pero sin duda, la recuperación de un mayor protagonismo de los puentes metálicos para el tren ha llegado de la mano de las soluciones con vigas de alma llena, también para puentes mixtos, impulsadas fundamentalmente en Francia. En los años 70 el desarrollo de los puentes de hormigón pretensado en la mayor parte de los países europeos había dejado arrinconado el uso de las soluciones metálicas en la construcción de puentes. En los años 80, sin embargo, se empezó a reintroducir la estructura metálica en puentes para carretera, con la cada vez más frecuente construcción de puentes de construcción mixta. Mientras en España y Alemania, por ejemplo, se tendió a usar más el cajón cerrado, en Francia la solución más frecuente fue la del tablero bijáceno.

Los más ligeros y flexibles puentes viga metálicos tardaron sin embargo en hacerse un hueco entre los puentes del tren, que no tanto tiempo atrás habían monopolizado. Sucedió en primer lugar y en mayor medida en Francia, aunque las primeras líneas del TGV en los años 80 todavía tenían sólo viaductos de hormigón pretensado. No sería hasta los años 90 cuando la línea de Paris a Lille incluyó hasta 15 viaductos metálicos o mixtos, tendencia que se confirmó con otros 23 puentes de este tipo en el TGV Mediterranée. En la más reciente línea del TGV Est, el porcentaje de las estructuras que emplean el acero alcanza ya el 90%. En España, en cambio, el hito del primer viaducto mixto para la alta velocidad no ha llegado hasta ya entrado el siglo XXI y apenas ha tenido continuidad, lo que supone un contraste de difícil explicación.

Los cada vez más exigentes requerimientos de rigidez y comportamiento dinámico de los puentes ferroviarios han tendido desde luego a hacer del robusto y contrastado hormigón una opción más atractiva frente a la mayor flexibilidad de las ligeras estructuras metálicas, lo que sin embargo no siempre está justificado y puede incluso resultar chocante si se considera el desarrollo histórico de los puentes para el tren. Si bien es cierto que en general las estructuras metálicas pueden ser más sensibles a los efectos dinámicos o a la fatiga, no es menos cierto que con un adecuado diseño estos fenómenos pueden y deben ser perfectamente controlables como por supuesto atestiguan infinidad de soluciones que vienen comportándose satisfactoriamente incluso bajo los más exigentes requerimientos de funcionalidad de las modernas líneas de alta velocidad. En ello juega un papel importante la propia losa de hormigón de los puentes mixtos, que además de participar en la resistencia local y global de la estructura, aporta una masa suplementaria y una capacidad de amortiguación que resultan fundamentales para el control de los efectos dinámicos que podrían provocar los actuales trenes de alta velocidad.

La tipología más empleada en el caso de los puentes ferroviarios, con Francia a la cabeza, es la del tablero de doble viga o bijáceno, que emula los magníficos puentes decimonónicos de Flachat con dobles vigas de alma llena y por entonces roblonadas, de los

Construcción por empuje del viaducto de St. Genies (TGV).

Vista en bancada de uno de los tramos del viaducto del Arroyo Las Piedras (LAV Córdoba-Málaga) y construcción del mismo viaducto por empuje desde ambos estribos (derecha).

que hemos visto varios ejemplos. Su rango habitual de luces está entre los 40 y 60 metros. La doble viga es de construcción más sencilla que la de un cajón cerrado y permite un mayor aprovechamiento de los materiales, con diafragmas transversales que pueden estar considerablemente distanciados, del orden de 8 o 10 metros. Como contrapartida no alcanza la nitidez visual de un cajón y, desde un punto de vista estructural, supone renunciar a la gran rigidez torsional de las soluciones cerradas. Ambas limitaciones se han mitigado en ocasiones cerrando el cordón inferior con prelosas de hormigón, que actúan también como encofrado colaborante en la zona de pilas para el hormigonado de una losa inferior que permite la doble acción mixta. Ello no sólo se traduce en ahorro en el ala inferior, tanto en espesores de chapa como en rigidización, sino que al cerrar el circuito tensional permite además un significativo aumento de la rigidez y capacidad a torsión, importante en los puentes de medias y grandes luces frente al caso más habitual de carga en el que sólo una de las vías recibe el peso del tren. Esta solución tiene además la importante ventaja de facilitar tremendamente el acceso por el interior del cajón durante la construcción y para posteriores tareas de inspección.

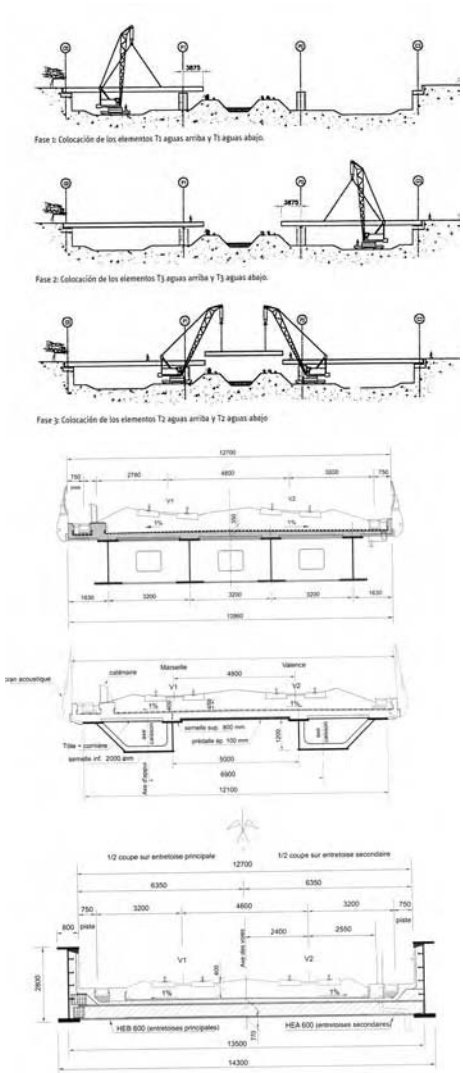
El primer puente en emplear este sistema fue el espléndido viaducto del Arroyo las Piedras, primero también en construirse con estructura metálica para la alta velocidad en España en el año 2005. Cuenta con 20 vanos con una luz de 63.5 m, alcanzando por tanto una longitud total de más de 1.200 m sobre pilas que llegan a superar los 90 m. Es sin duda uno de los viaductos más largos y altos construidos con esta tipología y, en el momento de su diseño, el de mayor luz de los puentes bijácenos para ferrocarril, por superar en medio metro al mayor de los antecedentes franceses. Este puente incorpora la doble acción mixta antes descrita, lo que ha permitido ajustar el canto, que en este caso es de menos de 1/16 de la luz y supone un cierto aumento de la esbeltez con respecto a las soluciones francesas cuya relación canto luz no baja en general de 1/14.

Viaductos bijácenos empujados en el TGV. Viaducto de Cheval-Blanc sobre el río Durance en proceso de empuje con el taller en el estribo cubierto y vigas acopiadas listas para su soldadura y lanzamiento. Empuje del viaducto sobre la A7 en Bonpas. La ligereza de la estructura metálica hace posible empujar tableros de canto variable como en el viaducto de La Mouse.

El empleo de la estructura metálica suele ir asociado a elevados niveles de prefabricación e industrialización durante la construcción que siempre resultan ventajosos. También resulta favorable por su ligereza y desde el punto de vista de la rapidez de montaje y de su capacidad para independizarse del terreno durante la construcción. Los problemas de conservación que tradicionalmente se achacan a la estructura metálica se solucionan hoy empleando aceros patinables o pinturas de creciente garantía y, sobre todo, con un cuidado diseño de los detalles que evite puntos de acumulación de suciedad o estancamiento de agua. Todo ello ha hecho de esta opción una de las más competitivas en Francia, aunque, también es cierto, es una alternativa que, en lo que se refiere a puentes de ferrocarril, se mantiene en muchos otros países curiosamente relegada frente al competitivo hormigón.

La construcción de los puentes bijácenos ha encontrado además en las técnicas de empuje una solución constructiva de gran eficiencia. En efecto, en estos casos el empuje puede hacerse lanzando exclusivamente la doble viga metálica, lo que supone un peso propio durante el lanzamiento que es sólo una parte pequeña de la carga total de diseño del viaducto y por lo general está bastante por debajo de la mitad del peso que supondría empujar un viaducto equivalente de hormigón. Por ello esta tipología, estando diseñada para resistir las sobrecargas del ferrocarril, y pese a que durante el empuje no se cuente con la completa sección resistente mixta, no se ve en general significativamente afectada en su diseño por los esfuerzos durante la construcción derivados del lanzamiento. El aspecto que probablemente requiere más atención en estos casos no tiene que ver con los esfuerzos globales durante construcción sino con los esfuerzos locales que resultan del hecho de que, durante el empuje, las reacciones de apoyo actúan sucesivamente a lo largo de todo el alma de las vigas, pasando por tanto por zonas no rigidizadas con el consiguiente riesgo de inestabilidad local del alma por carga concentrada. Este fenómeno, conocido como "patch loading", puede condicionar el espesor del alma y su grado de rigidización, del mismo modo en que, en los primeros puentes empujados del siglo XIX, una problemática análoga condicionaba la configuración de la celosía de las almas que se hacía por ello más tupida.

La mayor ligereza reduce sensiblemente la envergadura de los medios auxiliares con respecto a los de los viaductos empujados de hormigón; es posible reducir la capacidad de los gatos y usar una menor nariz o pescante de avance, cuya longitud en estos casos no suele superar el tercio de la luz y de la que en ocasiones incluso se ha prescindido. Los requerimientos de la zona de fabricación a situar en uno de los estribos son también menores. Todo ello ha hecho del empuje el procedimiento generalmente preferido en los viaductos ferroviarios metálicos más largos o ante el cruce de grandes obstáculos de los que independizarse en forma de anchos cauces, profundos valles o



Esquema del proceso constructivo del viaducto sobre el río Briançon (TGV).

Secciones transversales de puentes viga metálicos empleados en las líneas de alta velocidad francesas además del más habitual tablero bijáceno.

(derecha) Montaje con grúa de un tramo del viaducto de Cavaillon, sobre el río Durance (TGV).

transitadas vías. Por supuesto, la construcción con grúas y con caballetes y cimbras de apoyo es también un recurso frecuente, en particular en viaductos más cortos y bajos con un sencillo acceso, y con generalidad cuando se trata de puentes en celosía.

Aunque la configuración en doble viga inferior ha sido la más empleada entre los puentes metálicos o mixtos de las modernas líneas de nueva construcción, no conviene olvidar otras tipologías a las que también se recurre con cierta frecuencia. Si tomamos como referencia las líneas del TGV francés, entre los puentes metálicos de alma llena algo más de la mitad son bíjacenos, una cuarta parte de 4 vigas también inferiores, y el resto son soluciones en cajón o con vigas antepechadas laterales.

Los puentes con doble cajón son menos competitivos económicamente pero pueden llevar el rango de luces viables hasta los 60 ó 70 metros. Las vigas laterales, por su parte, suelen venir forzadas por condicionantes de gálibo bajo la rasante y requieren lógicamente todo un entramado de vigas transversales que dan soporte a la losa de la plataforma. Suelen ser viaductos más cortos, pues en los puentes más largos se tiende a buscar la solución más competitiva que es la bijácena, lo que queda patente si establecemos la proporción entre las distintas tipologías empleando, en lugar del número de puentes, la longitud de viaducto construida, en cuyo caso el peso de cada tipología se

Refuerzo sustitutivo del viaducto de Lamothe (Francia, 2006).

Puente de Havel (Alemania, 2003).

Puente de Caroní, finalizado y en construcción (Venezuela, 1992).

descompensa todavía más pasando los puentes mixtos bijácenos a acaparar casi un 85% de la longitud de estructura metálica construida en las línes del TGV .

Las vigas de alma llena se han empleado también en configuraciones menos convencionales, como la que recientemente ha permitido el imprescindible refuerzo, sin afección al tráfico, del puente en celosía de Lamothe, en la línea Paris-Toulose, o la del espléndido puente de Havel, que sustituyó en el 2003 a antiguos puentes contiguos en celosía de la línea Berlín-Spandau. Este puente debe dar paso a un tan elevado número de vías que, pese a su importante luz de 80 metros, es casi tan ancho como largo. Condicionado por los gálibos de navegación, la solución de vigas bajo el tablero no era posible, y al ser un puente tan ancho y esviado, la opción de varios arcos atirantados, paralelos pero decalados por el esviaje, podría haber llevado, desde un punto de vista visual, a un confuso bosque de elementos metálicos similar al que ya existía con los puentes en celosía y que debía evitarse en una zona densamente poblada. El puente ejecutado solucionó esta problemática mediante elegantes vigas antepechadas de alma llena, por encima de la losa de hormigón, cuyo canto varía suavemente con la ley de momentos.

En general, los mayores puentes metálicos modernos que soportan el paso del camino de hierro son en realidad puentes destinados a la carretera pero que permiten también el paso de alguna vía de ferrocarril ligero o tranvía. Emplean prácticamente siempre soluciones en cajón de alma llena, con ejemplos magníficos como son varios de los puentes metálicos de mediados de siglo sobre el Rin sobre los que cruza el tranvía y cuyas luces rondan muchas veces los 200 metros, llegando incluso a los 230 metros del admirable puente de Bonn-Sur. Son puentes puramente metálicos, a menudo previos al inicio de la construcción mixta, que emplean una losa ortótropa metálica para conformar la plataforma, solución ligera pero muy cara que en general es solo competitiva para las grandes luces y por lo tanto del todo excepcional. Ya entre los más modernos puentes de estructura mixta, probablemente el mayor del mundo que de paso al ferrocarril sea el de Angosturita, construido en 1992 sobre el río Caroní, en Venezuela. Se trata también de un gran cajón metálico bicelular con canto variable y losa superior de hormigón que salva una luz de 213 metros. Es, de nuevo, un puente mixto también en cuanto a su uso, pues la vía del ferrocarril lo comparte con 6 carriles de autopista. Todas estas pueden considerarse soluciones más propias de la carretera que del ferrocarril y son por ello de menor interés para este escrito. Específicas del ferrocarril sí son desde luego las líneas del TGV francés, donde casi un 90% de los puentes metálicos o mixtos han empleado también soluciones con vigas de alma llena. Solo el restante 10% de los puentes metálicos de estas líneas, que en longitud construida supone menos de un 5%, lo ocupan los arcos atirantados y, testimonialmente, las celosías.

Puente de Fehrman (Alemania, 1963), puente de Dintel Harbour (Holanda, 1999), puente de Yodowaga (Japón, 1997) y puente de Rottenburg, con una inteligente sección transversal en la que la plataforma situada a mitad del canto de la viga de rigidez resulta en una gran esbeltez aparente (Alemania, 1991).

Sin embargo, aunque mucho menos numerosos, los arcos adquieren siempre un especial protagonismo entre las estructuras de una línea por su gran presencia formal que se reserva a los pasos mayores y más significados. Actualmente la opción escogida para el arco metálico en los puentes de ferrocarril es casi con exclusividad la configuración atirantada o bow-string, lo que por otro lado no ha sido impedimento para que existan una gran diversidad de soluciones, generalmente para luces en el entorno de los 100 ó 120 metros, superando los valores más habituales que se sitúan entre los 30 y los 60 m, pero todavía lejos de las grandes realizaciones de las últimas décadas de la era del tren, con los 298 metros del magnífico puente de Hell Gate de principios de siglo a la cabeza.

Son, por supuesto, numerosas las obras que merecerían mención. Entre las mayores se encuentra el puente de Fehmarn, de 1963, con una excepcional luz de 248 metros que el ferrocarril comparte con la carretera o el puente de Dintel Harbour, construido en 1999 para el acceso ferroviario al puerto de Rótterdam, con una luz de 170 metros también notable, pues son pocos los arcos metálicos para el tren que en la segunda mitad de siglo hayan superado los 150 metros. En Japón cabe destacar el viaducto de Yodowaga, de 1997, un elegante puente multiarco con cinco vanos de 106 metros en Osaka, o el de Arakawa, de 1996 en Tokio, con un doble tablero para tráfico mixto.

En los puentes modernos, el mayor peso de los trenes y sobre todo los requerimientos funcionales ligados a las mayores velocidades de explotación han condicionado particularmente a los puentes en arco que, siendo estructuras que trabajan por forma, pueden experimentar deformaciones importantes ante las situaciones de carga concentrada o no simétrica. La ligereza de la estructura metálica no es en este sentido una ayuda sino más bien al contrario. El empleo de esta tipología ha estado por tanto particularmente marcado por la limitación de los desplazamientos máximos, sobre todo en el caso de las líneas de alta velocidad. Por ello en general las péndolas de cuelgue del tablero se inclinan en esquema análogo al de una viga Warren para reducir las flexiones en el arco mediante un cierto efecto de celosía. Los arcos más esbeltos, sin embargo, deben además buscar apoyo en una suficiente rigidez del tablero, como por ejemplo se hizo en los viaductos de Dintel Harbour y Yodowaga con dos potentes vigas antepechadas o como, más acentuadamente, se hace en los arcos con tablero en celosía. Es, al fin y al cabo, la adaptación a los arcos metálicos con tablero inferior del mismo concepto que habían empleado con el hormigón los arcos de tablero superior de tipo Maillart.

Puente sobre el Ebro (línea Zaragoza-Huesca, 2003), puente de Wittenberg (Alemania, 2000) y puente de Enneus Heerma (Holanda, 2001).

(derecha) Puente de Hamm (Alemania, 1987).

Es ésta la configuración que ha adoptado en España el magnífico puente metálico sobre el Ebro del desdoblamiento de la línea entre Zaragoza y Huesca, abierto en el 2004. Se trata de un arco muy esbelto que salva una luz de 125 metros apoyado en la gran rigidez de un tablero en celosía de canto importante pero adecuadamente integrado en el conjunto. El tablero inferior del arco es continuidad del de los vanos de acceso con similares vigas laterales en celosía unidas por un entramado de vigas en el cordón inferior que sustentan la losa de la plataforma. Ha sido la primera aplicación de la celosía mixta en un puente para alta velocidad en nuestro país.

Similar concepto había empleado en el año 2000 el arco del también notable puente de Wittenberg, que aunque de manera menos integrada combina igualmente la forma del arco y la rigidez de un tablero de celosía para permitir salvar al ferrocarril el río Elba con una luz de 156 metros. Aunque sin duda el mayor de los arcos metálicos para el ferrocarril que han empleado este sistema estructural es el puente de Hamm de 1987, con el que el tren salva una magnífica luz de 250 metros sobre el Rin en Dusseldorf. Se trata de soluciones en las que puede tanto hablarse de un arco apoyado en la rigidez de un tablero en celosía como de un puente viga en celosía reforzado en su mayor vano por un arco.

Otra muestra de la singularidad que es posible alcanzar en soluciones basadas todas en una configuración bowstring del arco es el puente de Enneus Heerma, para ferrocarril y carretera en Amsterdam, que tiene dos vanos gemelos de 75 metros que vuelan sendos arcos atirantados y un pequeño vano intermedio salvado por unos arcos invertidos cuya directriz da continuidad visual a la de los arcos principales.

Puentes de Louvain y Hauset (LAV Bélgica, 2005/2006), puente de Dora Baltea (LAV Italia, 2004), puente de Ogatayama (LAV Japón, 1995).

Puente de Garde-Adhémar o de la Donzere en construcción (LAV Francia, 2000).

En lo que se refiere a la alta velocidad, donde los arcos son poco numerosos por los motivos ya mencionados, son conocidas las obras del TGV Mediterráneo. El viaducto de Mornás salva una luz de 124 metros sobre el Ródano mediante un arco atirantado que con su característica geometría en forma de luna creciente presenta cierta reminiscencia a los viaductos en arco biapoyado de Eiffel, aunque probablemente sin alcanzar su gran elegancia y menos aún su sentido estructural. También conocido en esta línea es el viaducto sobre el canal de Donzere, que salva dos vanos de 110 metros con dos elegantes arcos bow-string gemelos entre los que, fruto de la lucida participación de los arquitectos que tan a gala se tuvo para las obras de esta línea, se añadió un semiarco central cuya aportación es despreciable desde un punto de vista estructural y como mínimo dudosa desde un punto de vista visual. El potencial que puede y debe tener la muy deseable colaboración entre arquitectos e ingenieros también en el diseño de puentes, no fue en estos casos, y en opinión de quien esto escribe, bien aprovechado.

También de esta línea es el arco atirantado de Bonpas sobre el peaje de la A-7, de 124 metros de luz, singular por el método constructivo empleado en el que el arco se prefabricó por completo fuera de su posición para ser después trasladado y montado desde un espectacular sistema de carros automóviles. En Bélgica se han construido recientemente interesantes arcos metálicos para las nuevas líneas de alta velocidad, con soluciones que ponen en entredicho la idea impuesta de que los puentes para el tren deben ser de gran pesadez. El viaducto de Louvain, entre Bruselas y la frontera alemana, por ejemplo, está resuelto con un esbelto arco metálico de 117 metros, y muy similar es el viaducto de Hauset, en Lieja. Su ligereza contrasta con la robustez de otras realizaciones como la finalizada en 2004 sobre el río Dora Baltea en la línea de alta velocidad entre Turín y Milán. También en Japón, país pionero en la alta velocidad, existen por supuesto magníficas realizaciones como la del viaducto de Ogatayama, de1995 y 136.5 metros de luz, que es uno de los mayores nunca construidos para el tren de levitación magnética.

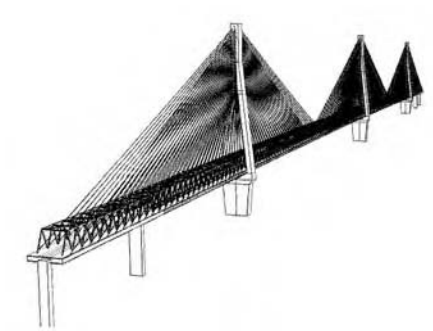
Viaducto sobre la A7 en Bonpas y viaducto de Mornás sobre el Ródano, finalizados y en construcción (LAV Francia, 2000).

Puente del Salto del Carnero (Zaragoza-Delicias, 2005). Puente de Hollandsch Diep (Holanda, 2005). Puente de Le Corbusier (Francia, 1994). Empuje del viaducto de Sant Boi en el acceso de la alta velocidad a Barcelona (2006).

Más allá de las tipologías más convencionales, y aunque las cargas y exigencias del tren son menos propicias para el desarrollo de soluciones singulares que las que corresponden a otros usos, el acero también se ha prestado a la realización de puentes más o menos especiales, incluso en líneas de alta velocidad. Sirven de valioso ejemplo en España, los recientes viaductos de Llinars o Sant Boi construidos para la llegada de la alta velocidad a Barcelona. Salvan luces de hasta 75 metros en emplazamientos donde los condicionantes de gálibo impiden recurrir a soluciones de viga bajo la rasante, empleando para ello la solución de vigas antepechadas laterales solidarizadas entre sí por correas transversales metálicas y la propia plataforma de hormigón. La mayor singularidad proviene de la geometría de dichas vigas, cuyo contorno se asemeja al de un puente colgante desde un punto de vista visual, que no estructural, restando así pesadez a los grandes cantos empleados.

Aunque menor, es en cierto sentido similar el viaducto mixto del Salto del Carnero, que también recurre a las vigas laterales, que pueden ser especialmente idóneas en tableros de vía única, e igualmente incorpora, desde un mástil que es prolongación de las propias pilas, atirantamientos que permiten al viaducto alcanzar una notable esbeltez. Otra solución mixta de cierta singularidad es la adoptada en Holanda para el largo cruce de la alta velocidad sobre el Hollandsch Diep, en la línea de alta velocidad entre Ámsterdam y Paris, que tiene una longitud de 1.190 metros salvados con vanos de 105 metros por una especial viga continua, que incrementa su canto sobre apoyos con unas células triangulares que apoyan sobre las cortas pilas de hormigón. Salvar aguas navegables es sin duda muy complejo en lo que se refiere a la ejecución de pilas y cimentaciones, pero en casos como éste ofrece la contraprestación de poder emplear los potentes medios de montaje marinos, con grúas flotantes de gran tonelaje que en este caso permitieron el montaje de las piezas metálicas del tablero en un plazo muy breve.

En general este tipo de soluciones singulares suelen reservarse a entornos urbanos, donde el resultado visual del puente adquiere especial relevancia y puede justificar soluciones especiales para los grandes viaductos que son, al fin y al cabo, los símbolos más visibles del esfuerzo triunfante de una infraestructura que se aproxima a la ciudad para crear un vínculo necesario y esperado entre dos núcleos que con ella pasan a estar más cerca. Es el caso, por ejemplo, del viaducto de Le Corbusier que permite el acceso del tren a la estación de Lille en Francia; sus dos tableros mixtos están formados por cajones no simétricos que apoyan sobre una serie de arcos metálicos rebajados que aciertan a integrarse en una gran plaza frente a la estación.



Esquema del puente atirantado para alta velocidad que cruzará el río Yangtze con dos vanos principales de 488 metros.

Mención aparte por su singularidad merecen, claro está, los puentes atirantados, la única tipología estructural moderna que no tiene su origen en el siglo XIX. Se trata, como sucede con los puentes colgantes, de una tipología cuya inmensa mayoría de realizaciones han estado destinadas a la carretera, siendo menos comunes las obras atirantadas que dan paso a una tráfico mixto de carretera y ferrocarril, y contadas las que van destinadas exclusivamente a éste último. El inicio de los puentes atirantados modernos, sin embargo, sí está ligado al ferrocarril, pues el que fue su principal iniciador, el alemán Franz Dischinger, desarrolló la idea al diseñar en 1938 un puente colgante de ferrocarril sobre el Elba, de más de 700 metros, en el que debía enfrentarse al tantas veces planteado problema de la dificultad de esta tipología para resistir las grandes cargas concentradas y disimétricas que producen los trenes. Como en los puentes colgantes para ferrocarril de Roebling o Gisclard, de los que ya hemos hablado, Dischinger optó por añadir tirantes de refuerzo al cable colgante principal, de forma que los tramos de tablero más cercanos a la pila se atirantaban en lugar de suspenderse. Aunque su diseño no llegó a construirse, una nueva idea había prendido, que tras la segunda guerra mundial alcanzaría una rápida y productiva difusión, sobre todo y primeramente en Europa.

Tres son los elementos principales que conforman el puente atirantado: los propios tirantes, que proporcionan apoyos más o menos rígidos al tablero; las altas pilas o mástiles, que anclan verticalmente los tirantes; y el propio tablero, que además de proporcionar la necesaria plataforma y salvar la corta luz entre sus flexibles apoyos, debe equilibrar la componente horizontal de la reacción de los tirantes. Se trata de puentes de gran presencia formal y sentido estructural, en los que la transparente estructura trasciende por encima del tablero generando obras de gran belleza. Por otro lado, todo ello ha llevado en ocasiones a forzar el uso de atirantamientos en casos en los que no resulta necesario, aspecto que de forma inevitable se refleja negativamente en la apreciación visual y coherencia estructural de la obra.

Los atirantados son puentes aptos para un amplio rango de luces, que hoy van desde los 100 metros hasta superar los 800 m en puentes de carretera y los 400 metros en puentes de ferrocarril o uso mixto. En la parte baja de dicho rango, los puentes atirantados compiten con los puentes arco y los mayores puentes viga, y cuando se trata de un puente de uso exclusivamente ferroviario suelen resultar menos competitivos; en la parte alta de su rango de luces, en cambio, los atirantados compiten con los puentes "cantilever", a los que hoy ya han desplazado casi definitivamente, y con los puentes colgantes pequeños y medios. Como éstos y como los arcos, los atirantados son puentes cuyo esquema estático depende de la forma y es óptimo para cargas uniformemente repartidas, pero se aleja en cambio de su situación ideal ante potentes cargas no uni-

La catenaria de electrificación superior para el ferrocarril ligero es visible sobre el puente de Severin sobre el Rin (Colonia, 1961).

Vista aérea y lateral del puente de Hoechst o Werks sobre el Main, entre cuyos dos mástiles pasa la vía ferroviaria (Frankfurt, 1972).

formes, lo que de nuevo ha limitado su aplicación en los puentes ferroviarios. Cabe diferenciar los puentes atirantados que soportan el paso del tren además del de los coches por las vigas de gran rigidez que incrementan sensiblemente el canto del tablero, si se comparan con los de los puentes exclusivamente carreteros. En cualquier caso, los puentes atirantados suponen pese a su flexibilidad una mejora sustancial en este sentido con respecto a los puentes colgantes, pues la semi-triangulación entre mástil, tirante y tablero les proporciona una más elevada rigidez ante las sobrecargas variables del ferrocarril, y por lo tanto la sobre-rigidez que ante éstas debe proporcionarse al tablero es relevante pero inferior a la necesaria en los puentes colgantes. Además, el aprovechamiento del tablero en el esquema resistente de los puentes atirantados proporciona otras importantes ventajas generales sobre los puentes colgantes, pues evita en general la necesidad de potentes anclajes al terreno con los correspondientes contrapesos, y, en igualdad de condiciones, tiende a reducir la cantidad de acero necesario. Por ello para grandes luces, por debajo de los 300-400 metros, la opción de los puentes atirantados suele hoy preferirse.

Algunos de los más destacados ingenieros se han inclinado hacia los puentes atirantados también por la libertad en el diseño que ofrecen. Permiten, en efecto, una gran variedad de geometrías y equilibrados esquemas resistentes, siendo posibles muy diversas configuraciones de los haces de cables o de las propias pilas, que han adoptado gran diversidad de formas o incluso inclinaciones. Las pilas suelen ser dos, pero también puede emplearse una única pila. Esta variedad en las posibilidades formales se ha explotado lógicamente más en la ausencia de las exigentes cargas y limitaciones deformacionales del ferrocarril, aunque una de las primeras realizaciones que permitió el paso del ferrocarril ligero junto a la carretera, construida en 1961 sobre el río Rin en Colonia, salvó una por entonces magnífica luz de 302 metros en una inusual pero espléndida configuración disimétrica con una única pila.

En 1972 el ya por otros méritos mencionado Finsterwalder construyó sobre el Main en Frankfurt el puente atirantado de Hoechst, que también compartían la calzada y las vías del ferrocarril urbano. Uno de las primeras realizaciones exclusivamente para el ferrocarril fue la del puente sobre el río Sava, en Belgrado, que salvó una luz de 254 metros apoyado en dos potentes vigas de rigidez en el tablero materializadas con potentes cajones metálicos.

Leonhardt, referente entre los referentes de la ingeniería estructural de la segunda mitad de siglo, fue sin duda uno de los primeros y más grandes impulsores de los puentes atirantados, como lo fue de tantas otras innovadoras estructuras metálicas o de hormigón de las que hemos visto ya varios ejemplos. De su oficina es, por ejemplo, el diseño del puente atirantado que en 1990 conectó la argentina Posadas con la paraguaya

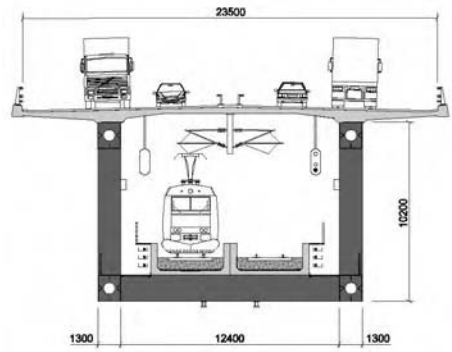
Puente de Kap Shui Mun (China, 1997).

Construcción en 1990 del puente de Posadas, que posibilitó el cruce del tráfico carretero y ferroviario sobre el río Paraná entre Argentina y Paraguay.

(derecha) Puente atirantado para el ferrocarril urbano de Vancouver (1990).

Encarnación, salvando para ello una luz principal de 330 metros sobre el río Paraná. Debiendo habilitar el tráfico ferroviario además del carretero, Leonhardt optó por emplear un tablero de hormigón, que merced a su mayor peso se adecua mejor a los requerimientos resistentes y de comportamiento dinámico y a fatiga de los puentes del tren.

Hasta ese mismo año, ya próximos al fin de siglo, no se construyó el primer puente atirantado exclusivamente para el pujante ferrocarril urbano, que se encuentra en Vancouver y salva una considerable luz de 350 metros. Para buscar las mayores luces que den paso al ferrocarril hay que mirar al continente asiático, donde los dos puentes atirantados gemelos del sistema Honshu-Shikoku salvan luces de 420 metros, recurriendo ya a un rígido tablero de celosías metálicas en dos niveles, el superior para la carretera y el inferior para 4 vías de ferrocarril, dos convencionales y dos de alta velocidad. Una luz 10 metros superior tiene el puente chino de Kap Shui Mun, de 1997, que fue en su día el mayor puente atirantado del mundo que soportase el peso del ferrocarril además de de la carretera.



Tablero recién completado del puente atirantado de la línea de alta velocidad entre Milán y Bolonia (2006).

Sección transversal del puente de Oresund, entre cuyas almas en celosía discurre la doble vía ferroviaria (conexión Suecia-Dinamarca, 2000).

(derecha) Vanos centrales atirantados del viaducto de Oresund. El tablero en celosía es continuidad del tablero mixto de los largos tramos de acceso (conexión Suecia-Dinamarca, 2000). Puente atirantado de Hitsuishijima en el espléndido sistema de conexión con multitud de grandes puentes entre las islas japonesas de Honshu y Shikoku.

En el año 2000 este puente fue superado en Europa por el puente de Oresund, en la reciente conexión por carretera y ferrocarril entre Suecia y Dinamarca. Este espectacular puente de casi 8 km de longitud total, tiene sendos tramos de acceso de más de 3 km resueltos con vanos de 140 metros en celosía mixta tipo Warren, por cuyo interior, bajo las calzadas de la plataforma superior, discurre la doble vía ferroviaria. De nuevo la celosía supone una excelente viga de rigidez para el puente atirantado central, con su luz de 490 metros que, aunque magnífica, es prácticamente igual a la del puente de Brooklyn e inferior a la del puente del Firth of Forth, ambos del siglo XIX. La dirección de las diagonales cambia en el tramo atirantado para orientarse según el eje de los atirantamientos

En lo que se refiere a los modernos trazados de alta velocidad, también se ha recurrido en ocasiones, aunque sólo excepcionalmente, a soluciones atirantadas. Este es el caso por ejemplo del tren de alta velocidad en Taiwan o el de la línea italiana entre Milán y Bolonia, que contará a su paso por el río Po con un puente atirantado de casi 200 metros de luz. Este puente, actualmente en construcción, cierra el pesente capítulo y con él un itinerario que se iniciaba con el padre del ferrocarril, Stephenson, y que nos ha llevado desde los 4 metros de luz del Gaunless Bridge, primer puente metálico para el ferrocarril, a los más modernos puentes atirantados, desde los pequeños arcos de hormigón en masa a los grandes viaductos de hormigón pretensado, de los primeros avances por prueba y error a los sofisticados y exigentes criterios de diseño actuales, pasando con el camino de hierro por un extraordinariamente rico legado de innovadoras tipologías, materiales en constante evolución, desarrollos técnicos y tecnológicos, épicas construcciones y, sobre todo ello, personas que con su ingenio han ido haciendo realidad los puentes de un tren que, como pocos, ha sido puente para el acercamiento de los pueblos y el progreso de las sociedades modernas.

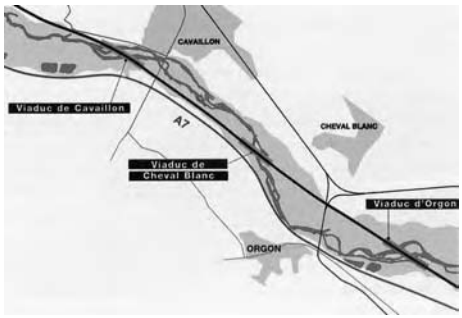
Personas y obras de las que, tan triste como inevitablemente, sólo cabe en este escrito recoger una pequeña parte, y a las que habrá que añadir las de una de las páginas doradas de la historia de los puentes ferroviarios, que no es sino la que bajo el impulso de la alta velocidad se está escribiendo hoy y ha de escribirse mañana con el mismo espíritu de innovación y superación que ha impregnado hasta nuestros días el progreso de los puentes del tren.

Los criterios de diseño que para ello se vienen empleando en los puentes contemporáneos serán ya parte del siguiente y último capítulo que adopta por ello un carácter más técnico, sesgándose su contenido hacia quienes más o menos directamente participan hoy de la concepción y construcción de los puentes ferroviarios.

[1] Así la sobrecarga de diseño que supone el tren puede asimilarse a una carga de 100 kN/m que en un típico viaducto de doble vía supondría una sobrecarga de más de 14 Kn/m² que contrastan con los 4 Kn/m² empleados en los puentes carreteros.

Futura red de alta velocidad española que llegó e definirse para el horizonte 2010, si bien sus plazos se han revisado y hoy se trabaja ya con el horizonte 2020.

La traza cuasi recta con la que la línea del TGV francés sobrevuela los meandros del río Durance es muestra paradigmática de las exigencia que suponen los trazados de la alta velocidad.



4. Criterios de Diseño en los Puentes Contemporáneos

4.1 Introducción

El renacimiento del ferrocarril que nos ha traído la alta velocidad está fomentando el proyecto y construcción de numerosos nuevos puentes para el tren. Si al acabar el siglo XIX la construcción de nuevas líneas de ferrocarril experimentó un freno muy marcado que se prolongó a lo largo de buena parte del siglo XX, actualmente las nuevas redes de alta velocidad, promovidas sobre todo en los Estados más desarrollados de Europa y en algunos países asiáticos, impulsan la construcción de muchos miles de kilómetros de nuevas, y novedosas, vías. Sólo en el presente año 2006 el Estado Español destinaba exclusivamente a la infraestructura para alta velocidad 4.265 millones de euros, lo que, puesto de otro modo, viene a significar que cada vez que se pone el sol hemos invertido en este país unos 2.000 millones de las antiguas pesetas en esta moderna forma de servicio ferroviario. Esto debe dar una idea de la importante apuesta estratégica que se está haciendo por la alta velocidad, apuesta que deberá prolongarse a corto y medio plazo para cumplir con el objetivo de que en el horizonte del 2020 la red española de alta velocidad supere los 4.000 kilómetros de vía tendida, siempre con trazados particularmente exigentes que están requiriendo y requerirán las más generosas condiciones geométricas.

Condiciones que contrastan con las de la mayor parte de la infraestructura ferroviaria que, datando del siglo XIX, se construyó cuando los medios para la construcción de grandes viaductos, la excavación de largos túneles o el movimiento de grandes volúmenes de tierra no eran comparables con los actuales, lo que llevó a los ingenieros a buscar trazas que en la medida de lo posible minimizasen el número y tamaño de estas obras. Así, los trazados decimonónicos no pocas veces tienen pendientes que superan el 2% y sus curvas se trazan con radios que se sitúan en general entre los 300 y los 600 metros, valores que como hemos visto supusieron una verdadera revolución en su momento, pero que son de un orden de magnitud inferior a los de las actuales líneas de alta velocidad, cuyos radios habitualmente rondan los 6.000 ó 7.000 metros, sin bajar en general de los 4.000

En consecuencia, la alta velocidad ferroviaria ha llevado al extremo la idea que se iniciaba en el siglo XIX con las primeras líneas del ferrocarril, en las que ya no era el camino el que se adaptaba a los puentes y túneles, sino que eran éstos los que debían acomodarse al camino. Cualquier observador curioso que desde la ventanilla de su avión sobrevuele un corredor de la alta velocidad, distinguirá en seguida la traza para los más veloces trenes por ser la que, entre las diversas visibles, corta el terreno con menor esfuerzo aparente, en alineaciones cuasi rectas que con sus sutiles curvaturas parecen no depender de la tierra que pisan.

Contraste de los trazados decimonónicos adaptados a la orografía con los de las modernas líneas de alta velocidad en las que túneles y viaductos se suceden sobre el relieve. Muestras de antiguos trazados en espiral del ferrocarril norteamericano (Georgetown y Union Pacific Railroad). Viaductos de la LAV Madrid-Sevilla y del Francolí en la LAV Lleida-Barcelona.

Claro está que esta sencillez aparente es fruto en realidad del mayor esfuerzo ingenieril que una infraestructura lineal pueda requerir; esfuerzo que, para el observador aéreo, se disfraza de limpieza y sencillez al quedar camuflado en continuas interrupciones del camino de hierro, que se esconde en sus túneles, y en las sombras de su plataforma que se hacen visibles en el terreno cuando las vías se elevan montadas sobre los incontables viaductos que salpican la traza. La modernidad de estos trazados se adivina no sólo por la capacidad tecnológica de la que hacen gala sino por los signos de respeto medioambiental, desgraciadamente menos presente en tiempos pasados, que desde el aire se hacen patentes por la ausencia de grandes terraplenes o desmontes, que tienden a sustituirse por permeables viaductos e invisibles túneles.

Si a todo ello se suma la intolerancia con los terraplenes altos de los trenes de alta velocidad, que no aceptan los ligeros asientos de la vía que inevitablemente tienden a producirse en ellos, se comprende fácilmente por qué las nuevas líneas destinadas a la alta velocidad requieren un número muy elevado de estructuras, con una media de casi una por kilómetro de vía tendida. Aproximadamente entre un 7 y un 10% de la longitud de una línea de alta velocidad discurre por túneles y viaductos, aunque esto depende lógicamente de la orografía de cada corredor. Existen casos extremos como el asociado a la llegada del tren de alta velocidad a Euskadi, con un trazado en túnel en quizás un 50% del recorrido y con viaductos extendiéndose aproximadamente de la mitad del itinerario restante. En España, en el 2020, los 4.000 kilómetros de líneas de alta velocidad previstos habrán supuesto miles de estructuras menores y en torno a 400 grandes viaductos. Estos suelen ser obras de muy elevada longitud, que acostumbran a salvar por ello no un obstáculo sino varios y promueven formas de construcción simple e industrializada. Por su envergadura son más divisables y también por ello buscan morfologías sencillas y uniformes que faciliten su integración en el entorno. A nivel de diseño estructural, son viaductos caracterizados por lo elevado de sus exigencias tanto en las cargas como en los requerimientos funcionales.

En efecto, a los condicionantes generales de cualquier puente, en cuanto a durabilidad y mantenimiento, afección hidráulica a los cauces que cruza, gálibos de tráfico y navegación, o integración visual y acústica en entornos sensibles, se suman en las estructuras para el tren diversos condicionantes específicos. Los primeros, y recurrentes a lo largo de todo este escrito, tienen que ver con la magnitud de las cargas del tráfico ferroviario, cuya sobrecarga y carga muerta asociada es entre 3 y 4 veces superior a la de, por ejemplo, un puente convencional de carretera [1].

Estas superiores cargas de los puentes ferroviarios se traducen inevitablemente en soluciones pesadas y robustas, lo que a su vez puede redundar, en zonas de riesgo sísmico, en mayores cargas de diseño ante el terremoto, que lógicamente crecen confor-

me lo hace la masa del tablero. Los mayores cantos, unidos a la superficie expuesta que suponen los largos convoyes ferroviarios (a los que se asigna una altura media de 3.5 metros) infieren también mayores fuerzas de arrastre por los vientos transversales, que en los viaductos de más altura sobre valles ventosos pueden ser significativos, sobre todo cuando el viaducto es en curva y a los vientos transversales se suma la fuerza centrífuga que se genera al desviar de su trayectoria a los pesados y veloces trenes [2].

Aunque si las diferencias en las cargas verticales o transversales con otros puentes son cuantitativas, las que tienen que ver con las sobrecargas horizontales en sentido longitudinal pueden muy bien considerarse cualitativas; los puentes ferroviarios deben hacer frente a las grandes fuerzas que pueden generar las masas de los trenes al arrancar o al frenar bruscamente y que son del orden de una cuarta parte su peso[3]. Ello condiciona tremendamente el diseño de las pilas y los estribos de los puentes ferroviarios, en soluciones que deben a su vez ser compatibles con las importantes deformaciones impuestas (dilataciones y contracciones) de unos tableros con frecuencia de gran longitud y cuya interacción con la propia vía durante todos estos fenómenos debe también controlarse. Estos son, como veremos, aspectos clave en la concepción global de estas estructuras.

Los segundos condicionantes específicos de los puentes ferroviarios son lo que tienen que ver con los críticos requerimientos funcionales o de servicio. En lo que se refiere a su capacidad resistente última o a rotura, todos los puentes se diseñan de forma análoga y, en general, independiente de la naturaleza de la carga que los solicita. Es en cambio en situación de servicio, cuando los diversos usos que pueden darse a un puente marcan sus distintos condicionantes, y los del ferrocarril son numerosos y exigentes, en particular cuando se trata de la alta velocidad.

Son dos aspectos principales los que enmarcan los requerimientos funcionales del puente ferroviario. Por un lado, el puente debe asegurar las condiciones de confort imprescindibles para el tráfico de pasajeros, y por otro, debe ser perfectamente compatible con la vía, estructura fronteriza entre el tren y el puente que es, como tantas otras cosas ligadas a las fronteras, tan decisiva como delicada. Ambos factores, que lejos de ser independientes pueden estar muy relacionados, se traducen en una serie de limitaciones que condicionan los giros, desplazamientos y aceleraciones máximas de la estructura y que exigen, durante el diseño, un adecuado control de los efectos dinámicos así como un cuidadoso análisis de la interacción entre la vía y el tablero del puente. La necesaria robustez que se deriva de estas exigencias se refleja en la proporción entre los pesos de los trenes y el del propio viaducto, rondando el peso habitual de los primeros los 20 kN/m y el de los segundos alrededor de los 200 [4].

[2] La fuerza centrífuga de diseño que pueden alcanzar valores en el entorno de las 30 kN/m, que son del mismo orden o incluso superiores al propio peso de muchos de los trenes.

[3] Un viaducto de doble vía de más de 300 metros de longitud debe poder soportar fuerzas longitudinales de 7.000 kN, aproximadamente el peso de todos los coches que caben en dos carriles del kilométrico paseo de Gracia en Barcelona.

[4] Si bien los pesos de los trenes más habituales están entre 20 y 25 kN/m, debe tenerse en cuenta que las sobrecargas de diseño equivalen a pesos de 80-100 kN/m.

(en pág. izquierda)

Los trazados de la alta velocidad sobrevuelan el terreno: tres viaductos del TGV Mediterráneo y un cuarto en la LAV a Sevilla.

Viaducto de Vernegués, con las suaves curvas de la traza del TGV al fondo.

Construcción del viaducto sobre los meandros y la llanura de inundación del río Guadalete, en la duplicación de la línea Sevilla-Cadiz

Los diferentes criterios de diseño que se derivan de todo ello, unidos a diversos ejemplos de cómo los puentes actuales vienen haciendo frente y solucionando todos estos condicionantes, configuran la esencia del presente capítulo que, en la medida de lo posible, pretende desarrollarse sin entrar en datos o cifras de carácter excesivamente técnico, pero que estará inevitablemente más dirigido a aquellos cuyos habituales quehaceres están relacionados con el diseño y construcción de los puentes ferroviarios. Su contenido se centra en la tipología de puentes viga con la que, como se ha mostrado, se construyen actualmente la inmensa mayoría de puentes para el tren.

4.2 El esquema longitudinal en los actuales puentes del tren

Las posibilidades tipológicas de los puentes de ferrocarril hoy en día son, como se ha expuesto, muy diversas y van desde los puentes arco, pasando por todo tipo de puentes losa o viga, hasta puentes más singulares como pueden ser los atirantados. Son igualmente generales las posibilidades en cuanto a las secciones transversales o los procedimientos constructivos de unos puentes del tren que son tanto de hormigón, como metálicos o mixtos. No cabe duda de que existen tipologías y materiales usados preferentemente, pero desde un punto de vista genérico, la morfología de los puentes del tren es esencialmente análoga a la que puedan presentar viaductos destinados a otros usos como la carretera, con los que guardan en cuanto a su tipología pocas diferencias cuantitativas, aunque alguna conceptual o cualitativa.

Sí es en cambio específico de los puentes del tren, y particularmente decisivo en su concepción, lo que se refiere a su esquema longitudinal, que será por ello objeto de especial atención en el presente capítulo. Al hablar del esquema longitudinal de un puente se engloba todo lo que tiene que ver con la forma en que interaccionan entre sí y colaboran en las tareas resistentes sus diferentes elementos, desde los cimientos, pasando por pilas y estribos, hasta el propio tablero y la vía que sustenta.

El esquema longitudinal de un puente o viaducto se caracteriza fundamentalmente por la unión o forma de apoyo del tablero sobre las pilas y estribos, así como por la posición de las posibles juntas en el tablero y la vía. Todo ello cobra especial interés cuando, como es habitual en los puentes del tren, se trata de estructuras de longitud importante. El esquema longitudinal marca particularmente la respuesta de un viaducto en lo que se refiere a tres de sus más decisivos requerimientos:

- la capacidad para transmitir al terreno las grandes fuerzas longitudinales producidas por el frenado y arranque de los trenes (o por el sismo).
- la limitación de la influencia que la interacción con el tablero, que está muy lejos de ser un elemento fijo, pueda tener sobre los carriles de la vía.
- el control del efecto de las deformaciones impuestas del tablero.[1]

Estos tres fundamentales condicionantes, de los que los dos primeros son exclusivos de los puentes de ferrocarril, están íntimamente relacionados y deben por tanto considerarse siempre conjuntamente, pudiendo lo que resulta favorable para uno ser en

[1] Las deformaciones impuestas son las variaciones en la longitud del tablero que se deben a las variaciones de temperatura y, en los tableros de hormigón pretensado, a los acortamientos por fluencia y retracción.

[2] Dificultad que, lógicamente, se mitigará o acrecentará en función de lo cerca o lejos que se encuentre cada pila del punto fijo del tablero. Cuando un tablero se dilata o se contrae, existe un punto que permanece en su misma posición y al que se llama punto fijo. Su situación depende de la rigidez relativa de las diferentes pilas y apoyos. El desplazamiento longitudinal de cualquier punto del tablero cuando éste se dilata o contrae será por tanto mayor cuanto más alejado se encuentre del punto fijo.

cambio desfavorable para otro. Esto puede ilustrarse, por ejemplo, considerando las pilas de un viaducto continuo que deban diseñarse para ser capaces de trasmitir al terreno la fuerza de frenado.

En sentido longitudinal el tablero puede considerarse infinitamente rígido y el interés frente al frenado se centra en la subestructura que forman pilas, estribos y cimentaciones. Pilas de reducida altura tendrán más capacidad para transmitir las fuerzas horizontales por frenado si se fijan al tablero, pero en cambio por su mayor rigidez se adaptarán con dificultad a las deformaciones impuestas del dintel [2]. Si las pilas fijadas al tablero son de más altura, podrán en cambio acompañarlo sin grandes esfuerzos en sus deformaciones longitudinales, pero por otro lado su capacidad para colaborar en la transmisión de las fuerzas de frenado será más limitada. El frenado, en definitiva, demanda una subestructura rígida solidarizada al tablero, mientras que las inevitables deformaciones impuestas requieren en cambio pilas desconectadas longitudinalmente del tablero o bien suficientemente flexibles, en lo que es un ejemplo entre los muchos posibles de cómo la concepción del esquema longitudinal debe forzosamente alcanzar un compromiso entre exigencias con frecuencia enfrentadas.

Otro ejemplo evidente es el que se refiere a los largos tableros sin juntas. Por un lado, por su continuidad, resultan favorables para la flexión general del tablero y para poder llevar la fuerza de frenado desde cualquier punto del puente hasta los estribos o pilas más rígidos y capaces. Por otro lado, un dintel continuo de gran longitud implica grandes desplazamientos por deformaciones impuestas [3], lo que obliga a desligarlo horizontalmente de muchas o incluso todas las pilas, renunciando así a la potencial contribución de buena parte de la subestructura para resistir el frenado o el sismo. A su vez, estas grandes deformaciones impuestas no permiten mantener carriles continuos para las vías, haciendo indispensables en al menos un extremo del viaducto las poco deseables juntas en la vía que reducen la funcionalidad y el confort en la explotación de la línea [4].

Esto es debido a que las deformaciones impuestas del tablero producen desplazamientos relativos entre éste y la vía, lo que a su vez genera fuerzas horizontales de rozamiento entre ambos que pueden acumularse sobre el carril y llegar a agotar su capacidad resistente. Por ello, la disposición de carril continuo, sin juntas, está limitada a estructuras de hormigón con una máxima longitud dilatable que suele situarse en el entorno de los 90-100 metros, si bien nuevos desarrollos en los aparatos de fijación del carril que buscan facilitar el deslizamiento entre éste y la estructura pueden actualmente permitir incrementar sustancialmente este valor [5]. En general, sin embargo, tramos continuos del orden de 100 metros fijados en su extremo, o bien de 200 metros si se fijan

[3] Un tablero de hormigón pretensado puede contraerse del orden de 1 mm por metro de longitud, lo que significa que algunos de los tableros que son de orden kilométrico, podrían experimentar en uno de sus extremos desplazamientos con valores en el entorno de un metro.

[4] y suponen también renunciar a la capacidad del propio carril para trasladar fuera del viaducto parte de las fuerzas de frenado.

[5] La instalación en sistemas de vía en placa de un cierto número de fijaciones con capacidad de deslizamiento, del tipo ZLR (zero longitudinal restraint), puede permitir prescindir de los aparatos de dilatación en la vía con longitudes de dilatación considerablemente por encima de las convencionalmente admitidas. Este tipo de fijaciones se ha empleado con éxito en varios puentes como el de Ben Franklin, sobre el Delaware en Philadelphia, o el kilométrico puente sobre el río Olifants en Sudáfrica. Se trata de dispositivos que permiten el movimiento del carril sin apenas fricción en ausencia de carga, pero que sí ofrece resistencia ante posibles fuerzas de frenado cuanto el peso del tren está presente.

Junta de dilatación en el estribo de un viaducto del AVE.

[6] Aunque tanto puede influir el material y el proceso constructivo a emplear en el esquema longitudinal, como ser el esquema longitudinal más idóneo el que condicione los materiales y procedimientos de construcción.

en su punto medio, se han considerado el límite para mantener sobre un viaducto el deseable carril continuo. Por ello no resulta posible en los puentes de longitud media y larga mantener al mismo tiempo la favorable continuidad tanto en el carril como en el tablero.

El esquema longitudinal debe, en definitiva, proporcionar un controlado equilibrio entre aspectos igualmente críticos pero contrapuestos. Al plantearlo, la longitud y altura del viaducto son como se ha comentado, factores cruciales, y la influencia de otros aspectos como pueden ser el material a emplear, los procesos constructivos posibles o el terreno de cimentación disponible pueden también ser decisivos[6]. En cambio, aspectos como pudieran ser la carga (o número de vías en el viaducto), la sección transversal escogida o incluso la propia luz de los diferentes vanos pueden hasta cierto punto quedar en segundo plano al concebir la configuración longitudinal del puente.

Las juntas sobre pilas son claramente apreciables en estos ejemplos de viaductos isostáticos para el ICE alemán.

Para ilustrar todo ello nada mejor que emprender un itinerario por las soluciones con las que se ha resuelto el esquema longitudinal de algunas de las más representativas realizaciones a nivel europeo. Éstas son lógicamente muy diversas en función de qué aspecto o condicionante prevalezca, lo que no sólo depende de cada puente concreto sino con frecuencia de las directrices establecidas por distintos países o administraciones.

En Alemania, por ejemplo, la administración ferroviaria impone que cualquier parte de la superestructura pueda ser sustituida, de la forma más rápida y sencilla posible, por ripado transversal. Es este un condicionante añadido que limita en buena medida los posibles esquemas longitudinales para los viaductos alemanes, pues obliga a fragmentar longitudinalmente los tableros para posibilitar el eventual reemplazo de alguna de sus partes. Así, la solución recomendada ha sido la de un tablero formado por una sucesión de vanos biapoyados sustituibles, de 40 a 60 metros de luz, que apoyan sobre las pilas mediante aparatos de apoyo, normalmente tipo pot.

Existen incontables viaductos que emplean esta tipología de sucesivos tramos isostáticos, que en Alemania se construyen con más frecuencia mediante cajones unicelulares in situ sobre cimbra o autocimbra, pero a la que lógicamente se adapta también particularmente bien la construcción mediante vigas prefabricadas, en doble T o artesas, a la que se ha tendido más en España y en otros países como puede ser Italia, que cuenta con valiosos ejemplos como los de los numerosos viaductos prefabricados por tramos biapoyados, con gran variedad de luces y tipologías, de la línea de alta velocidad entre Roma y Nápoles.

Más allá de que en estos puentes el tablero este conformado por tramos independien-

[7] La presencia del carril continuo entre tramos independientes puede permitir cierto grado de reparto de las fuerzas longitudinales entre ellos y por lo tanto entre las diferentes pilas. La fracción de la fuerza total que puede transmitirse de un tramo a otro es en cualquier caso menor, y así debe ser pues de lo contrario se corre el riesgo de que el frenado sobrecargue en exceso el carril aproximándolo a un posible fallo por pandeo.

La doble línea de apoyo de los viaductos isostáticos lleva a pilas de gran anchura con independencia de su altura que, en el caso de Alemania, deben además ser visitables de cara a la inspección y eventual sustitución de los elementos de apoyo.

tes y por lo tanto individualmente sustituibles, o de que pueda tratarse de una tipología de gran facilidad constructiva, probablemente una de las mayores ventajas de este tipo de puentes radique en que, al subdividir el tablero en muchas partes, sus longitudes dilatables son muy reducidas. Esto minimiza el posible efecto desfavorable de las deformaciones impuestas del tablero sobre la vía y hace posible que el carril apoye sobre puentes de gran longitud cruzándolos de forma continua, sin necesidad de juntas de dilatación, lo que redunda en valiosas ventajas en la explotación y el mantenimiento de la vía.

Igualmente importantes son, sin embargo, las desventajas que cabe achacar a esta forma de esquema longitudinal frente a otras alternativas. En efecto, al renunciar con sus vanos isostáticos al favorable hiperestatismo, la eficiencia estructural del tablero se reduce, lo que se refleja en la pesadez de unos dinteles cuya relación canto/luz no suele bajar del 1/12. Por otro lado, desde el punto de vista de su funcionamiento longitudinal, el minimizar el efecto de las deformaciones impuestas tiene la contrapartida de que la fragmentación del tablero impide la colaboración entre los distintos elementos de la subestructura y obliga, por ello, a ejecutar todas las pilas y cimentaciones con suficiente rigidez y resistencia para resistir por sí solas las posibles fuerzas de frenado y arranque sobre cada vano, lo que sólo es posible en viaductos de altura moderada, por debajo en general de los 20 metros [7].

Se trata además de soluciones que conllevan una gran proliferación de juntas estructurales y de aparatos de apoyo, que deben duplicarse sobre cada pila. Esto conlleva unas elevadas necesidades de mantenimiento asociadas a unos elementos cuya durabilidad es muy inferior a la de la estructura propiamente dicha y que no pocas veces son causa de problemas durante el servicio. Muestra de ello es la imposición asociada en los puentes alemanes de que todas las pilas deban ser visitables, de forma que el acceso a la zona de apoyos y juntas sobre pilas se facilite de cara a su frecuente inspección y eventual sustitución. Son por ello características de las líneas de alta velocidad alemanas las puertas de acceso en la base de pilas de un gran tamaño, que no suele venir forzado por condiciones estructurales sino por las necesidades de accesibilidad y de espacio para albergar en cabeza una doble línea de apoyos.

Quien esto escribe tiene sólo constancia de un caso en Alemania en el que, a causa del incendio de una locomotora, una parte de un viaducto quedo dañada y pudo ser fácilmente sustituida por ripado transversal sacando así provecho de las imposiciones en este sentido para el diseño de todos los puentes alemanes. Sucesos de este tipo pueden, sin embargo, considerarse aislados, y no parece descabellado pensar que los elevados costes asociados a la mayor dimensión de todos los puentes y al mantenimiento pro-

longado en cada uno de ellos de sus numerosas juntas y apoyos podrían ser suficientes para costear holgadamente las problemáticas esporádicas que pudiesen surgir en el caso de que algún puente particular resultase parcialmente dañado.

Quizás ello explique que sólo en Alemania se imponga esta condición de completa reposición por tramos del tablero, que por otro lado admite otras soluciones más allá de la de fragmentación por vanos; en efecto, aunque ha venido recomendando los tramos biapoyados, la norma alemana de puentes ferroviarios contempla también la posibilidad de subdividir el tablero en tramos continuos, aunque de cara a su posible sustitución limita la máxima longitud de cada tramo a 400 metros, condición sin duda restrictiva pues es habitual que los viaductos para alta velocidad superen esta longitud. Así una evolución de los puentes isostáticos por la que en los últimos años se ha optado en ocasiones es la que pasa de disponer una junta estructural en cada pila a disponerla sólo en una de cada tres, en una solución de más sentido estructural que ha permitido mitigar en parte las desventajas de las soluciones isostáticas al tiempo que se mantienen longitudes dilatables reducidas y el carril continuo.

Viaducto del ICE alemán en Bartelsgraben, con tablero continuo.

En el magnífico viaducto sobre el río Main, en Gemünden, la junta en los extremos del tramo principal aporticado es perfectamente visible.

Otro tipo de solución más común es la que pasa ya a emplear tramos continuos de elevada longitud, entre 200 y 400 metros generalmente, con los que se incrementan obviamente las longitudes dilatables, pasando de tener muchas juntas con pequeños movimientos a contar con pocas con movimientos grandes, lo que conlleva renunciar a la ventaja de evitar las juntas de dilatación en la vía. Es en cualquier caso una solución que se ha empleado en varios de los mayores viaductos para evitar los citados inconvenientes de las soluciones con vanos isostáticos. Sin duda dos de los más conocidos ejemplos corresponden a sendos puentes de las líneas de alta velocidad sobre el río Main, ambos construidos a mediados de la década de los 80 con diseño de Leonhardt, Andra und Partner.

El primero, que no en vano fue escogido por Leonhardt para la portada de su tan conocido libro sobre la estética de los puentes, está situado en Gemünden y divide sus más de 800 metros en tramos continuos independientes y reemplazables. La posición de las juntas estructurales es claramente identificable pues éstas requieren pilas más anchas para poder albergar una doble línea de apoyos. El mayor de estos tramos independientes es un elegante puente pórtico con 3 vanos de canto sutilmente variable de los que el central salva el río con una luz de 135 metros. Las pilas en "V" empotradas al tablero y articuladas en la base resultan muy eficaces en la transmisión de las fuerzas horizontales y su efecto pórtico proporciona una rigidez que permite una solución de gran esbeltez, con relaciones canto/luz en pila y centro de luz de 1/20 y 1/30 respectivamente, lo que contrasta profundamente con los valores habituales en los viaductos

ferroviarios alemanes. La longitud total de este tramo principal es de casi 300 metros, lo que exige que en las juntas estructurales de sus extremos se dispongan también juntas de dilatación en el carril. La longitud máxima de los restantes tramos continuos del tablero es de 165 metros, lo que ha permitido prescindir de juntas de dilatación en el carril en todo el resto del puente. Estos tramos continuos menores llevan las fuerzas de frenado a los estribos o a pilas rígidas suficientemente bajas, con una distribución de apoyos fijos y deslizantes compatible con las deformaciones impuestas del tablero.

El segundo puente se encuentra en Veitshoechheim y tiene una longitud de más de 1.250 metros que se divide de nuevo en tramos continuos de menos de 400 que pueden ser reemplazados. En este caso el tramo principal y mayor salva el río con un esbelto arco de 162 metros de luz que ya se ha descrito en el capítulo anterior. A efectos de la transmisión de la fuerza de frenado, todos los tramos independientes de un lado del puente se unen longitudinalmente y transmiten las fuerzas de frenado a un único punto situado en la clave del arco, donde éste se solidariza con el tablero para ser también utilizado como un excelente transmisor de la carga horizontal. El resto de los apoyos de esta parte del tablero son lógicamente deslizantes. La longitud de viaducto restante, en el otro lado del puente, es también continua a lo largo y transmite las fuerzas de frenado a tres pilas consecutivas de reducida altura, que son las únicas que se fijan a esta otra parte del tablero y lógicamente marcan la posición del que será su punto fijo. El viaducto completo queda por tanto dividido en dos tramos dilatables de 820 y 460 metros, cuyos puntos fijos se sitúan en sendos puntos intermedios de cada tramo, siendo necesario un aparato de dilatación en el carril tanto en la junta entre dichos tramos como en los estribos.

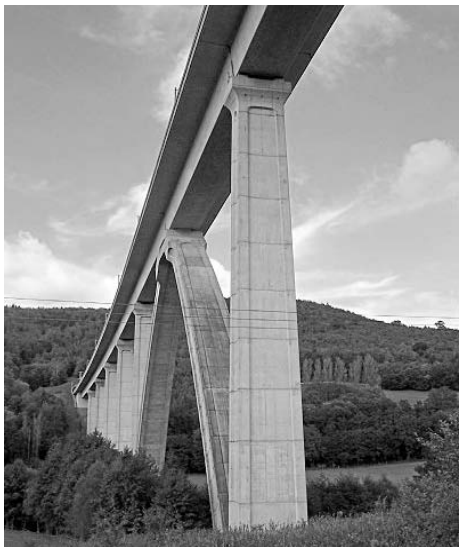
Viaducto de Veitshoechheim, con su espléndido arco sin rigidez para el paso de la alta velocidad alemana sobre el Main.

El sobresaliente viaducto de Rombach, a 100 metros sobre el fondo del valle, es uno de los más altos que se hayan construido para la alta velocidad.

Establecer la continuidad a efectos de fuerzas horizontales entre los tramos independientes del tablero, ya sean éstos vanos isostáticos o tramos continuos de longitud menor a 400 metros, ha sido imperativo en los viaductos de mayor altura, en los que resulta poco viable el que las flexibles pilas puedan transmitir las posibles fuerzas de frenado y arranque de cada vano o tramo independiente, siendo por tanto necesario que el tablero tenga continuidad para poder llevar dichas fuerzas a algún punto longitudinalmente rígido. Un recurso habitual en los puentes alemanes es el de emplear en estos casos arcos o puntales curvos capaces de resistir las cargas horizontales del frenado de todo el puente.

Particularmente conocido es el espléndido viaducto de Rombach de la línea de alta velocidad Hanover-Würzburg, que cruza un ancho valle sobre pilas cuya altura máxima roza los 100 metros con una sucesión de 17 vanos de 58 metros biapoyados, sustituibles por ripado y por tanto independientes en lo que se refiere a la flexión vertical,

Un recurso frecuente en las líneas alemanas para la eficaz transmisión de las fuerzas longitudinales es el de las pilas inclinadas en delta o los arcos. Viaductos de Pfieffe, Fulda y Waelsebach.



pero que se solidarizan longitudinalmente mediante pretensado, de forma que a efectos de deformaciones impuestas y cargas longitudinales de frenado el tablero funciona como un único dintel continúo. El punto fijo se genera en el centro del tablero mediante dos enormes puntales inclinados, con una ligera curvatura antifunicular de su propio peso, que además de recoger eficazmente las fuerzas de frenado salvan el fondo del valle a modo de arco con una luz de 116 metros, dos veces la longitud de vano. Análogas soluciones se han empleado en otros varios viaductos, como los de Fulda, Wümbach o Pfieffe.

En todos éstos casos, al unir longitudinalmente los diferentes tramos, la longitud dilatable pasa a ser la de todo el tablero y de nuevo se sacrifica inevitablemente la continuidad del carril, que requiere una junta de dilatación en cada estribo. En consecuencia, fruto de la gran altura de pilas, en estos viaductos se renuncia a la vez al hiperestatismo a flexión del dintel y a una de las mayores ventajas compensatorias que ofrecen los viaductos conformados por vanos isostáticos, que no es sino la de permitir un carril continuo sin juntas; todo ello en aras únicamente de posibilitar la sustitución, por ripado transversal y en un plazo teórico de dos días, de un posible vano dañado.

En el igualmente notable viaducto de Waelsebach, en cambio, se pudo mantener el carril largo continuo sin juntas de dilatación al tiempo que se solucionaba eficazmente la transmisión de las fuerzas horizontales en un viaducto de más de 700 metros y una altura considerable, algo superior a los 40 metros en el punto más alto. Para ello se recurrió a una sucesión de cuatro arcos que, además de salvar el valle con amplias luces de 128 metros, actúan de nuevo como eficaces transmisores de las cargas horizontales de frenado. El tablero está formado por sucesivos vanos isostáticos, que se mantienen independientes longitudinalmente de forma que se limitan las longitudes dilatables y se posibilita un carril sin juntas. Consecuentemente, las pilas reciben las posibles fuerzas horizontales de frenado desde cada vano biapoyado e independiente. En las zonas laterales las pilas son suficientemente bajas y rígidas para transmitirlas por sí solas al terreno. En la parte central y más alta del viaducto, la presencia de los arcos reduce obviamente la altura de las pilas, lo que hace de nuevo posible que éstas les transmitan eficazmente las posibles fuerzas de frenado. Los dos vanos que apoyan sobre las pilas más altas que nacen en los arranques lo hacen con apoyos deslizantes, para situar los apoyos fijos de cada vano siempre sobre la pila más baja y próxima a la clave del arco. No cabe duda, en cualquier caso, que en el evento del frenado las pilas introducirán importantes flexiones locales en el arco que requiere por tanto de un canto generoso que le proporcione ante ellas la rigidez y capacidad resistente necesarias. Es una solución con gran presencia formal y no menos sentido estructural, cuyo justificado sobrecoste por

la construcción de los arcos pudo por otro lado compensarse en parte al permitir reducidas luces de 25 metros para los vanos del tablero.

Recurrir a elementos de rigidez horizontal, como los puntales inclinados o arcos de los anteriores ejemplos alemanes, no es sin embargo ámbito exclusivo de los puentes de altura importante, y por ejemplo en la línea de alta velocidad belga entre Bruselas y Colonia se han construido recientemente varios viaductos que recurren de forma sistemática a esquemas aporticados con pilas en "V", en una configuración en cierto modo análoga a la del viaducto sobre el Main en Gemünden. Son puentes en los que tramos continuos del dintel, solidarios con las pilas, forman esbeltos pórticos que se intercalan con vanos simplemente apoyados, limitando así las máximas longitudes dilatables. Tanto los tramos continuos o isostáticos del dintel como las propias pilas los forman elementos prefabricados pretensados y solidarizados entre sí, lo que limita el sobrecoste de emplear repetidamente pilas de geometría inclinada. Las juntas estructurales son difícilmente distinguibles y quedan bien integradas en un nítido esquema estructural que ha permitido construir viaductos de gran longitud con una solución con la que se recogen eficazmente las fuerzas de frenado y que es a la vez compatible con un carril continuo sin juntas. Ejemplos de esta tipología son los viaductos de José, Herve, Ruyff o Battice, este último con una longitud de más de 1.200 metros.

Viaducto de Battice, en la red de alta velocidad Belga.

Un pórtico neutro interrumpe la continuidad del tablero en un viaducto para el TGV francés.

En Francia y en España, al contrario que en los anteriores ejemplos alemanes o belgas, la tendencia en los grandes viaductos ha sido la de procurar maximizar la eficiencia estructural del dintel adoptando tableros continuos e hiperestáticos de gran longitud, lo que en cambio conlleva inevitablemente sacrificar la continuidad del carril.

La longitud viable para estos viaductos continuos tiene por otro lado ciertos límites, marcados fundamentalmente por la capacidad técnica de los aparatos de dilatación para admitir grandes movimientos y por el riesgo de desorganización del balasto en juntas con grandes desplazamientos. En Francia ha solido establecerse una longitud máxima dilatable para los tableros de hormigón pretensado de 450 metros, que puede suponer un tablero continuo de hasta 900 metros si el punto fijo se sitúa en su centro.

La forma en la que los más largos viaductos franceses con longitudes por encima de estos valores enfrentan la necesaria fragmentación del tablero se caracteriza por la utilización del "pórtico neutro", también llamado en ocasiones "vano inerte". Se trata de un vano isostático, longitudinalmente independiente del resto del tablero, que se intercala en un punto intermedio del dintel entre dos tramos continuos de gran longitud.

Coincidiendo con las juntas estructurales que se generan en ambos extremos de este vano, se introducen sendos aparatos de dilatación en la vía. De esta forma, el movimiento que corresponde a las deformaciones impuestas en los dos largos tramos de tablero adyacentes no se acumula en una única junta sino que se reparte entre dos.

El pórtico neutro acostumbra a ser más corto que el resto de vanos del viaducto, lo que tiene sentido pues tiene el mismo canto que el resto del tablero pese a que su configuración biapoyada es menos eficaz. Además la Administración Francesa recomienda que su longitud no supere los 50 metros. Por ello el pórtico neutro puede suponer una cierta fractura visual en el desarrollo del viaducto, efecto que suele verse acrecentado por ser las pilas que soportan este vano más anchas que el resto, fruto de la necesidad de espacio su cabeza para la doble línea de apoyos que requieren las juntas estructurales que sobre ellas se sitúan. Esta mayor anchura, por otro lado, puede resultar estructuralmente conveniente, pues estas pilas deberán soportar por sí solas los esfuerzos de frenado en el pórtico neutro, que queda desligado del resto de la estructura.

En cuanto al esquema longitudinal de los largos tableros continuos, ya sea en viaductos de un único tramo o en más largos viaductos con dos o más tramos normalmente separados por pórticos neutros, no suele recurrirse como en Alemania a elementos singulares de rigidización longitudinal. Generalmente, para solucionar la transmisión de las fuerzas de frenado se han buscado configuraciones formalmente más sencillas que básicamente pasan por fijar el tablero continuo o bien a los estribos, o bien unas pocas pilas consecutivas suficientemente rígidas.

La alternativa más habitual es la de fijar el tramo continuo a un estribo, que actúa como elemento rígido y masivo para recoger las fuerzas longitudinales. El punto fijo del tablero se sitúa por tanto en su extremo y el resto de sus apoyos sobre pilas son lógicamente deslizantes. En el caso de tableros particularmente largos que se dividen en dos tramos continuos, lo más habitual es que cada uno de ellos se ancle a un estribo y entre ambos se sitúe un pórtico neutro. Un ejemplo destacado de esta configuración es el viaducto de la Grenette, en la línea del TGV Mediterranée. Tiene una longitud de 947 metros que se divide en dos tramos continuos de 447 metros y un pórtico neutro intermedio de 53. Con idéntica configuración pero todavía mayor es el viaducto de Verberie, del TGV Nord, que tiene dos tramos laterales de 690 y 800 metros más un pórtico neutro intermedio de cerca de 50, lo que supone una longitud de más de kilómetro y medio. Al fijar dichos tramos a los estribos, las longitudes dilatables son muy importantes, de hasta 800 metros, superando en mucho las recomendaciones francesas y los valores más habituales en las líneas del TGV.

(en página derecha) Viaductos de la Grenette, de Verberie y de Ventabren para el TGV. En la 3ª y 4ª pilas de la imagen de éste último se llega a apreciar el incremento de diámetro, que debe resistir el frenado.

Particularmente en viaductos de tanta longitud, que como éste superan holgadamente el kilómetro, se ha considerado más conveniente en las obras francesas recurrir a las pilas para soportar las fuerzas longitudinales sobre el puente, desligando al tablero de unos estribos que pasan a ser mucho menores. Mientras que en el caso de fijar el dintel al estribo la longitud dilatable es igual a la del tramo continuo completo, cuando se fija el tablero a alguna de las pilas, el punto fijo se sitúa en torno a éstas en un punto intermedio del tablero, y por lo tanto la máxima longitud dilatable se divide. Por ello, en estos casos pueden contemplarse tramos continuos más largos a cambio de disponer una junta de dilatación del carril en los estribos sobre los que el tablero pasa a poder deslizarse.

En el largo viaducto de Ventabren, por ejemplo, su longitud total de más de 1.7 kilómetros se divide en sólo dos tramos continuos independientes de casi 850 metros, separados por un pórtico neutro en el punto medio del viaducto de 45. La longitud dilatable en este caso se redujo a poco más de 400 metros al anclar sendos tramos continuos del tablero no en los estribos sino en una pareja de pilas centrales en cada caso. Se disponen juntas de dilatación en el carril tanto en los estribos como en las dos juntas estructurales en los extremos del pórtico neutro. Las pilas con apoyo deslizante en cabeza tienen un diámetro de 5 metros, las pilas para el apoyo del pórtico neutro, que deben absorber el frenado en este tramo, son de 6 metros, y por último, las dos parejas de pilas que deben poder recoger el frenado de los dos largos tramos continuos tienen un extraordinario diámetro de 10 metros.

Las pilas que como estas últimas se solidarizan longitudinalmente con el tablero marcan una posición del punto fijo próxima a ellas, pero de la que cada una estará en general separada una cierta distancia. En función de esta separación estas pilas deberán poder absorber, además de los esfuerzos de frenado, mayores o menores desplazamientos en cabeza como consecuencia de las deformaciones impuestas del tablero. Debe alcanzarse un equilibro entre fijar al tablero pocas pilas, una o dos, que se llevarán una mayor parte del frenado pero se mantendrán cerca del punto fijo y por tanto poco afectadas por las deformaciones impuestas; o bien optar por fijar un mayor número de pilas, tres o más, con lo que se reparte mejor el frenado, pero en cambio se tendrán pilas fijas al tablero que por estar más alejadas del punto fijo experimentarán mayores desplazamientos impuestos en cabeza. En general se tenderá hacia la primera opción en viaductos más bajos y hacia la segunda en los más altos. De igual modo, es necesario alcanzar un compromiso al determinar las dimensiones de las pilas fijadas al tablero, que deberán ser lo suficientemente rígidas para soportar las fuerzas de frenado, pero al mismo tiempo suficientemente flexibles para poder absorber inevitables desplazamientos impuestos en cabeza.

Viaducto de Vernegues y del doble viaducto de Avignon, finalizado y en construcción. La junta a media madera empleada en este viaducto es claramente visible en el viaducto finalizado de la imagen inferior.

La reducción en las máxima longitud dilatable que se deriva de emplear las pilas y no los estribos como elementos de anclaje longitudinal ha permitido en otros viaductos franceses disponer una junta simple entre largos tramos continuos prescindiendo del pórtico neutro. Así se hizo por ejemplo en el viaducto de Vernegues, cuya longitud de 1.208 metros se dividía en dos tramos continuos mediante una única junta estructural sobre una de las pilas. El desplazamiento que se acumulaba en esta única junta se reducía al estar ambos tramos continuos anclados en pilas próximas a ella, haciendo innecesario el pórtico neutro. El carril requirió una junta de dilatación en esta junta y en cada uno de los estribos.

Aunque el más conocido de cuantos puentes emplean esta configuración es probablemente el doble viaducto de Avignon, con una longitud de un kilómetro y medio y vanos regulares de 100 metros que se construyeron por voladizos sucesivos con dovelas prefabricadas. Dada la luz, el procedimiento constructivo y lo cuidado de su integración y continuidad visual, la posibilidad de incluir un pórtico neutro quedó descartada. En su lugar, la necesaria junta estructural se realizó mediante un apoyo a media madera, totalmente excepcional en el ámbito de las grandes obras para la alta velocidad. Esta junta, que se sitúa entre las pilas 5 y 6, divide el viaducto principal en dos tableros, el norte de 475 metros, y el sur de 645. Para evitar la acumulación de grandes desplazamientos en dicha junta, cada uno de estos tramos no se ancla en los estribos sino en dos pilas próximas a la junta. En el tramo norte las pilas que se solidarizan con el tablero son la 4 y la 5 (esta última mediante un completo empotramiento con el tablero) y en el sur la 8 y la 9. Así pues, en la junta sólo se acumula la dilatación de la zona comprendida entre las pilas 5 y 8 aproximadamente. De nuevo el carril cuenta con un aparato de dilatación en dicha junta y sobre los estribos.

En los habituales viaductos metálicos (mixtos) de las líneas de alta velocidad francesas, los criterios en referencia al esquema longitudinal han sido esencialmente los mismos, con idéntico empleo de los pórticos neutros pero con la diferencia favorable de que en los tableros mixtos las deformaciones impuestas a largo plazo son considerablemente inferiores que las de los tableros de hormigón pretensado, pues lógicamente no se tiene deformación por fluencia y la debida a la retracción del hormigón se coarta en parte.

Aunque las dilataciones térmicas puedan en cambio ser algo superiores, en general las deformaciones máximas de una estructura mixta no superarán valores del orden de 0.5-0.7 mm/m, lo que puede suponer entre un 50-60% de las que se experimentarían a largo plazo con un viaducto equivalente de hormigón.

Estas cifras de deformación total a largo plazo, cuya escala temporal son los años o a lo sumo los meses, son por otro lado relativas. En efecto, debe tenerse en cuenta que los fenómenos de la fluencia y la retracción son lentos y la rigidez del balasto frente a los movimientos diferidos que producen es menor que la que pudiera ofrecer ante cambios rápidos como puede ser la variación diaria de temperatura o, por supuesto, el frenado. Además, a efectos de su influencia sobre el carril, lógicamente sólo son relevantes los movimientos que se producen tras la fijación de la vía, que puede retrasarse considerablemente respecto a la fechas de hormigonado y tesado del tablero, sobre todo en estructuras importantes con largos plazos de construcción. Por ello, buena parte de las deformaciones diferidas por fluencia y retracción pueden no afectar al carril al producirse previamente a su fijación al tablero. Las operaciones de mantenimiento en el balasto y la vía también pueden contribuir a relajar posibles tensiones provocadas por los desplazamientos a largo plazo.

Vista de un pórtico neutro en un típico viaducto bijáceno mixto para el TGV. Viaductos de Saint Genies y de l'Arc, en construcción.

Entre todas las deformaciones impuestas de la estructura, deben por tanto considerarse como más críticas las debidas a las variaciones térmicas. Esto por ejemplo explica que, pese a que los tableros de hormigón pretensado puedan experimentar deformaciones a largo plazo considerablemente superiores a las de un puente metálico, el EC-1 permita en cambio una mayor longitud dilatable, de 90 metros, en puentes de hormigón o mixtos con carril continuo sobre balasto que en puentes metálicos, para los que fija el límite en sólo 60 metros.

Por todo ello, la menor deformación a largo plazo de los viaductos con estructura metálica no se ha traducido en cambio en realizaciones con mayor longitud dilatable, y en Francia la práctica generalizada de mantener longitudes de dilatación por debajo de los 400 o 450 metros, se ha venido aplicando por igual en los viaductos mixtos y los de hormigón. Así, puentes mixtos con una longitud total por debajo de los 400 metros acostumbran a construirse, como los de hormigón, mediante un único tramo anclado a uno de los estribos y con un único aparato de dilatación de vía en el estribo móvil contrario. Ejemplos de esta configuración pueden ser el viaducto bijáceno de Touloubre o la propia celosía mixta de l'Arc, ambos de más de trescientos metros. Por encima de los 400 ó 450 metros empiezan a ser habituales esquemas que incorporan ya una junta estructural sobre una pila intermedia o bien un pórtico neutro en uno de los vanos intermedios del viaducto, como en el caso del viaducto de Saint-Géniès, que divi-

de sus 550 metros en dos tramos de 297 y 209 metros, con un pórtico neutro intermedio de 44. El tablero se fija a los estribos y sólo hay junta de carril en los bordes del pórtico neutro.

Esta configuración se mantiene para longitudes que se aproximan al kilómetro como la de los viaductos empujados vecinos de Chaval-Blanc u Orgon, de 994 y 942 metros respectivamente, que atestiguan como un esquema longitudinal con pórtico neutro dificulta pero no impide la construcción con empuje. En el caso del viaducto de Cavaillon que con 1.500 metros es el único puente mixto en la línea del TGV Meditarranée que supera el kilómetro, se optó por pasar a disponer dos pórticos neutros, con una configuración en las longitudes de los diferentes tramos de 393+51+765+51+240. El tramo central y mayor se fijaba lógicamente a pilas intermedias con lo que su longitud dilatable es del orden de la mitad de su longitud total. En este caso se optó por una construcción con grúa.

El viaducto de Mornas, con una longitud de 862 metros, es un ejemplo de los viaductos franceses de gran longitud, en torno al kilómetro, que se dividen en dos tramos continuos separados por un pórtico neutro. El primer tramo de 370 metros que incluye el ya descrito arco bowstring, se separa del segundo con un pórtico neutro de 45 metros en el vano que sigue al arco.

Viaducto de Cavaillon en construcción (derecha).

En lo que se refiere a España, actualmente la tipología más habitual en los grandes viaductos de las nuevas líneas de la alta velocidad es la que emplea un único tablero continuo a lo largo de toda su longitud, que ha desplazado a la de los puentes isostáticos o cortos puentes hiperestáticos diseñados para la primera línea Madrid-Sevilla del 92.

La tendencia hacia los largos viaductos continuos se inició en un principio siguiendo el referente francés, es decir, recurriendo en los viaductos más largos al empleo de un pórtico neutro o vano inerte. Sin duda un claro ejemplo es el sobresaliente viaducto sobre el río Cinca, que posiblemente sea, junto con el puente sobre el Ebro, la obra más simbólica y de mayor envergadura del tramo Zaragoza-Lleida y fue además el primer viaducto de la alta velocidad española que se proyectó para ser construido por empuje. Sus 830 metros de longitud se dividen en dos tramos laterales de 318 y 338 metros fijados en sendos estribos y entre los que se intercala un corto tramo continuo formado por 3 vanos de 58 metros que actúa como pórtico neutro. El frenado de los dos largos tramos laterales se recoge en sendos estribos, mientras que el que se produce en el corto tramo inerte se recoge en las 4 pilas sobre las que apoya

Viaductos con vigas prefabricadas isostáticas en el valle del Ebro y sobre el Guadalmez, éste segundo en la LAV Madrid-Sevilla.

Viaducto sobre el río Cinca en la LAV Zaragoza-Lleida.

Actualmente, sin embargo, se procura en la medida de lo posible prescindir de juntas estructurales a lo largo de todo el tablero incluso en viaductos de longitud elevada como el del Cinca, evitando tramos neutros o inertes y pasando en general a tener un único tramo continuo. La práctica más habitual en España, más marcadamente incluso que en Francia, es la de anclar dicho tablero continuo a uno de los estribos, que actúa como punto fijo y debe poder resistir las fuerzas de frenado sobre el tablero, mientras que el resto de apoyos son deslizantes. Sin duda uno de los motivos que ha hecho de este uno de los esquemas más habituales entre los grandes viaductos del AVE ha sido la frecuente preferencia por el empuje como procedimiento constructivo, fruto del alto grado de optimización y elevado rendimiento que en nuestro país ha alcanzado esta técnica.

En los viaductos empujados es necesario disponer en uno de los estribos el parque de fabricación de dovelas. Es éste un elemento especialmente adecuado para ser aprovechado como elemento de anclaje longitudinal del tablero lo que justifica la tendencia a adoptar esquemas longitudinales con punto fijo en el estribo solidario con el parque. Por otro lado, el por muchos motivos justificado interés por evitar juntas estructurales se ve acrecentado por razones obvias cuando el procedimiento constructivo escogido es el empuje. Aunque existen desde luego antecedentes de puentes con pórtico neutro que se han construido por empuje desde un solo estribo, como el del viaducto de la Grenette, en el TGV Meditarranée, o el propio viaducto sobre el Cinca, que empleó para ello un pretensado exterior provisional en la zona del tramo neutro que se retiró

una vez concluido el empuje, no cabe duda que la solución francesa de emplear un vano inerte que fragmenta el tablero para dividir su longitud dilatable se adapta particularmente mal a la construcción por empuje. Esto ha contribuido sin duda a que este tipo de esquema longitudinal haya visto muy limitado su número de aplicaciones en nuestro país y se esté tendiendo en cambio a llevar los largos tableros continuos a longitudes dilatables cada vez mayores.

Un límite claro para dicha longitud de dilatación es el que establece la propia capacidad de los aparatos de dilatación de vía, que actualmente pueden llegar a absorber desplazamientos de más de 120 centímetros, lo que permite longitudes de dilatación de tableros de hormigón pretensado por encima del kilómetro. Además, el uso de correderas entre el extremo móvil de la estructura y el murete de guarda permite mitigar el problema de desorganización del balasto. Ello ha permitido que sean varios los viaductos españoles, de largos tableros continuos anclados a un estribo, en los que se han alcanzado longitudes dilatables de orden kilométrico y que, excediendo con mucho las habituales en las líneas francesas y desde luego en las alemanas, se aproximan al límite de la capacidad de unos aparatos de dilatación que por otro lado se mantienen en continua progresión. Pueden servir de ejemplo el viaducto de Vinaixa, en la línea de Lleida a Barcelona que alcanza una longitud total de 1.044 metros, o el viaducto del Huerva, de 1.122 metros en la línea del AVE Madrid-Zaragoza, que anclado a un estribo tiene una longitud dilatable que supone un record todavía no superado.

Anclando el tablero continuo a las pilas en lugar de a un estribo se parten como hemos visto las longitudes dilatables, aunque ésta es una configuración más empleada en Francia que en España. Así se ha proyectado, por ejemplo, el viaducto empujado sobre el arroyo de Sagides en la línea Madrid-Zaragoza, en el que se aprovechó un promontorio elevado para disponer una pila intermedia en delta para recoger eficazmente el frenado, o el viaducto sobre el Llobregat en Martorell, que una vez construido tendrá una longitud continua de 200 metros sobre la que podrá discurrir la vía sin juntas al fijarse el tablero en una pila central en V que divide en dos la longitud dilatable. Con sólo dos juntas de vía en estribos, podrían alcanzarse con esta configuración longitudes teóricas de viaducto continuo de más de dos kilómetros, lo que sin embargo nunca se ha llevado a la práctica, optando en cambio por fragmentar el tablero para longitudes por encima de los 1.200 metros, con las que ya es difícilmente viable mantener un único tramo continuo anclado a un estribo.

Viaducto del Huerva en la LAV Zaragoza-LLeida.

Algunos de los más largos viaductos del AVE: Viaductos de Plasencia de Jalón, del río Jarama, del río Jalón, del río Genil (en construcción con autocimbra) y de Arroyo del Valle.

Viaducto de Vinaixa en la LAV Lleida-Barcelona.

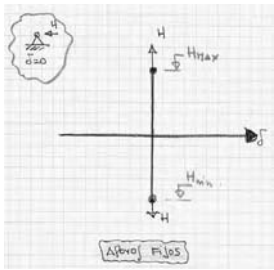
Para ello se ha seguido tanto el modelo francés, incorporando un pórtico neutro intermedio como en el caso del viaducto de 1.228 metros sobre el río Ginel, como los modelos alemanes, ya sea con una sucesión de tramos continuos de longitud moderada, por debajo de los 450 metros, o directamente dividiendo el tablero en vanos isostáticos. Un ejemplo de la primera configuración puede ser el viaducto de Plasencia de Jalón, cuyos 1.270 metros se dividen en 3 tramos, de los que el primero se ancla al estribo y los dos siguientes a una pila común intermedia de gran rigidez. Sin embargo ha sido la segunda configuración la que más se ha empleado en los viaductos de muy gran longitud en España. Los de los ríos Genil, Jarama o Jalón, con 1.392, 2.216 y 2.238 metros respectivamente, son algunos de los muy largos viaductos de alta velocidad construidos por tramos isostáticos. Éstos se intercalan en ocasiones con tramos hiperestáticos para salvar localizadamente una luz mayor, pero en general siguen un esquema longitudinal de fragmentación por vanos análogo al del referente alemán, con el que es posible mantener un ventajoso carril continuo sin juntas.

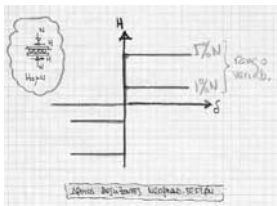
También inspirado en los modelos alemanes está el recientemente construido viaducto de Arroyo del Valle, en la LAV Madrid-Valladolid, que recurre a los puntales inclinados formando un arco ojival para recoger eficientemente las fuerzas longitudinales salvando al tiempo una luz de 132 metros. Se trata de un tablero continuo de 1755 metros, construido con autocimbra, que lógicamente sitúa su punto fijo en el arco partiendo así su longitud dilatable.

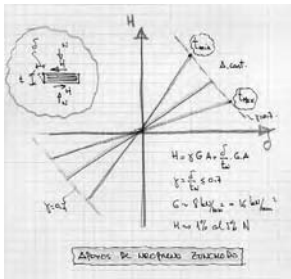
Los largos viaductos isostáticos como los de algunos de los ejemplos anteriores suelen localizarse en las amplias llanuras de inundación de los ríos, sobre las que se desarrollan a poca altura del terreno y, en la mayor parte de su longitud, sin obstáculos que requieran grandes luces, con lo que se mitigan algunas de las ya comentadas pegas estructurales que puede tener esta tipología. No sucede lo mismo, sin embargo, con los elevados requerimientos de mantenimiento asociados a este tipo de soluciones cuajadas de juntas verticales y horizontales, en las que proliferan los aparatos de apoyo, y que no son sino una parte del precio que se deriva de la fragmentación de la estructura.

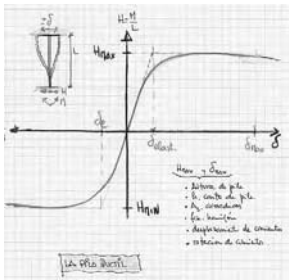
[8] En los estribos de los puentes integrales, el muro frontal y las aletas deben ser independientes para que el primero pueda ser lo suficientemente flexible.

Gráficas que recogen el comportamiento de los diferentes tipos de apoyo: fijos, deslizantes, de neopreno zunchado y, como uno más, la pila dúctil.









En este aspecto, la opción opuesta es la de los puentes integrales, que se caracterizan por su monolitismo estructural, con total ausencia de aparatos de apoyo o juntas de dilatación que atender y conservar. Se trata de estructuras en las que el tablero se empotra directamente en todas las pilas, sin elementos intermedios. En estribos bajos, la silla del estribo es prolongación y remate del tablero, y en los que son altos, es el muro frontal del estribo el que puede integrarse con el dintel [8]. Los empujes horizontales provocados por las tierras y las sobrecargas se difunden de un estribo a otro a través de un tablero cuyo punto fijo se situará sensiblemente en el centro del tablero.

La apuesta por el monolitismo estructural tiene claras ventajas desde el punto de vista de la robustez –tan hermanada con el hiperestatismo– de la durabilidad, que es consecuencia de la ausencia de juntas y aparatos ajenos a la estructura, o de la eficiencia estructural, que se logra al maximizar la capacidad de colaboración entre los distintos elementos de un puente en el que, por ejemplo, toda la subestructura en su conjunto podrá contribuir en la respuesta frente a las importantes fuerzas horizontales que pueden provocar los trenes o el sismo. Frente a ello, los puentes integrales tienen una única y decisiva salvedad a la que hacer frente: el adecuado control del efecto de las deformaciones impuestas sobre una subestructura solidaria con el tablero y que por tanto deberá poder acompañarlo en todas sus deformaciones longitudinales.

El análisis de un puente integral, al no tomar el atajo de la fragmentación estructural, exige rememorar y actualizar conocimientos sobre diversos aspectos esenciales de las estructuras, entre los que probablemente el más fundamental sea el de la ductilidad, y deformabilidad asociada, de los soportes comprimidos. Pilas y estribos monolíticos con el tablero, y adecuadamente concebidos, pueden ser capaces de añadir a su obvia función como soporte vertical la de eficaz transmisor de las fuerzas horizontales o la de flexible apoyo que, solidario con el tablero, es capaz de acomodarse a sus movimientos. La ductilidad, "puente sobre nuestra ignorancia", es para todo ello un atributo indispensable. La "pila dúctil", cuyo concepto tan rico ingenierilmente emerge en el contexto de los puentes integrales, podría de hecho interpretarse como uno más entre los posibles elementos de apoyo, con su correspondiente relación entre fuerza y desplazamiento horizontal, con los que los ingenieros contamos para solventar la transferencia de cargas horizontales desde la vía al terreno de forma eficiente y compatible con las deformaciones impuestas del tablero. La mayor reflexión ingenieril que exige puede sin embargo ser una vía hacia potenciales soluciones de mejorada robustez, durabilidad y eficiencia.

No cabe duda, en cualquier caso, de que se trata de una tipología particularmente sensible a las deformaciones del tablero y por lo tanto a su longitud, situándose el umbral de su eficiencia en longitudes de viaducto en el entorno de los 100 ó 140 metros, dependiendo de la altura de pilas y estribos. Por ello la aplicación de los ventajosos puentes integrales se ha restringido a un rango de realizaciones menor en lo que se refiere a su envergadura, aunque no tanto en lo que se refiere a su número. La alta velocidad española cuenta con sus primeros puentes integrales desde que en el 2003 se concluyeron varios de longitud moderada, inferior a los 70 metros, en el ramal de acceso a Zaragoza.

Ante la necesidad de llegar a longitudes mayores, o bien cuando los estribos sean bajos y apoyen sobre terrenos poco deformables, cabe ir a soluciones intermedias en las que las pilas centrales y más próximas al punto fijo se empotren al tablero, pero en cambio se empleen aparatos de apoyo sobre los estribos y en ocasiones también sobre las pilas laterales más alejadas del punto fijo, en lo que han dado en denominarse puentes semi-integrales. Es esta una configuración longitudinal de la que existen numerosas realizaciones de significativa envergadura, pues no es infrecuente emplearla en puentes construidos por voladizos sucesivos en los que también desde el punto de vista de la construcción resulta favorable el empotramiento pila-tablero. El puente de la Voulte, uno de los primeros y más destacados viaductos de hormigón pretensado empleó esta configuración longitudinal ya en 1955, como también lo ha hecho el puente sobre el Duero en Oporto que es, además del mayor puente viga de hormigón para el ferrocarril, todo un elogio al monolitismo estructural.

También la construcción con autocimbra se presta a la realización de este tipo de puentes, como atestigua el viaducto de Cornellà, construido en un ramal de mercancías asociado a la llegada de la alta velocidad a Barcelona. El monolitismo pila-tablero que caracteriza a los puentes integrales y semi-integrales es en cambio más difícil de alcanzar con soluciones prefabricadas o mixtas e imposible con el tan extendido procedimiento constructivo de los tableros empujados.

La opción de los puentes integrales puede también ser una alternativa ventajosa en el caso de los típicos viaductos ferroviarios que se desarrollan a lo largo de grandes longitudes con alturas moderadas sobre el nivel del suelo y que como hemos visto se han solucionado en muchas ocasiones con tableros de vanos isostáticos que descansan sobre multitud de aparatos de apoyo, 4 por vano, a atender y mantener. Así, en el trazado de la nueva conexión ferroviaria del corredor mediterráneo con la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona, se ha proyectado un viaducto de cerca de 3 kilómetros de longitud que discurrirá sobre la llanura de inundación del río Francolí sin necesidad de

ningún aparato de apoyo o dilatación ni en la estructura ni en la vía. Nada, salvo acero, hormigón y el carril largo continuo sobre ellos a lo largo de más de 2.900 metros.

Para ello se ha subdividido la longitud del viaducto en una sucesión de puentes integrales de 3 vanos cuyas luces van desde los 30 hasta los 45 metros. El viaducto pasa así a estar formado por estructuras integrales de longitud moderada, lo que permite controlar las longitudes dilatables del tablero y disponer un carril sin juntas, al tiempo que se cuenta con una unión monolítica entre el tablero hiperestático y cada una de las pilas y estribos del viaducto. Cada estructura monolítica de 3 vanos cuenta con 4 pilas dúctiles; las dos centrales, de altura moderada, pueden resistir las fuerzas horizontales apoyadas en la rigidez de un efecto pórtico que es fruto de su empotramiento con el tablero. Por su parte, en las dos pilas laterales, situadas lógicamente más lejos del punto fijo, el espesor se reduce a la mitad, lo que les proporciona la flexibilidad necesaria para acomodarse a las deformaciones impuestas del tablero. Ambos tipos de pilas se han proyectado de forma que las esbeltas pilas laterales adyacentes de dos subestructuras contiguas conformen un conjunto de igual geometría al de las pilas centrales, generando una "pila diapasón" que en realidad son dos y que permite que la continuidad visual del viaducto no se vea afectada por su subdivisión estructural.

En cierto modo análoga es la propuesta para este tipo de largos y bajos puentes ferroviarios que hace Jörg Schlaich, sin duda uno de los mayores referentes de la ingeniería estructural contemporánea. Quejoso de la excesiva "solidez" que se impone con las luces y el sistema estructural habituales en Alemania, Schlaich sugiere una solución todavía no realizada que busca una mayor ligereza y transparencia. Propone para ello adoptar luces menores, más acordes con la reducida altura de las pilas, y una mayor eficiencia estructural a través del hiperestatismo de un esbelto dintel continuo y solidario con la subestructura. El viaducto, de nuevo, se subdividiría en varias estructuras parciales de pocos vanos que contarían con un elemento de rigidez horizontal en su centro y esbeltas pilas laterales capaces de flectar siguiendo las deformaciones impuestas en el tablero.

Se ha hablado hasta ahora del esquema longitudinal, tan ligado a las acciones horizontales, sin profundizar sin embargo en la que puede sin duda ser una de las más importantes: el sismo. Las posibles cargas sísmicas son en efecto muy dependientes de cada emplazamiento y se prestan menos a una descripción genérica, si bien conviene no dar por finalizado el presente apartado sin mencionar el papel que en varios de los puentes hasta ahora comentados han jugado los dispositivos antisísmicos.

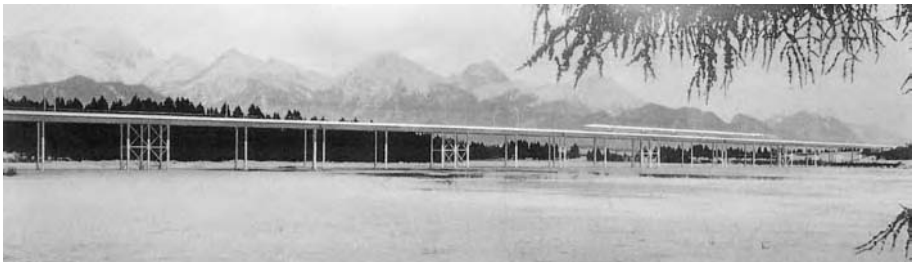
(en página anterior)

Puente integral en el acceso del AVE a Zaragoza. Viaductos semi-integrales de la Voulte y de Sao Joao. Una pila del viaducto de Cornellá esperando para solidarizarse con el tablero en construcción.

Viaducto semi-integral en la línea Estrada de Ferro-Carajas, Brasil.

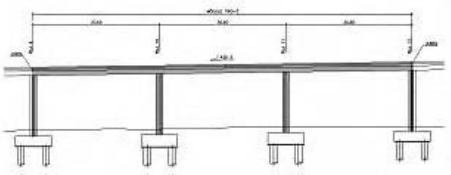
La necesidad de fijar el tablero a la subestructura para resistir las fuerzas horizontales del tráfico ferroviario con unos movimientos muy limitados no permite que, como acostumbra a hacerse en los puentes carreteros, el tablero pueda aislarse mediante neoprenos de la subestructura con el fin de reducir la acción sísmica. Ello unido a la elevada masa de los tableros que soportan el paso de los trenes puede suponer elevadas fuerzas por sismo que exigirán una gran robustez de la subestructura, muy ligada al hiperestatismo y monolitismo estructural, pero ante todo un comportamiento dúctil de la estructura que permita absorber y disipar la energía que introduce el sismo, en particular por lo que se refiere a la conexión de las pilas y estribos con tablero y cimientos. También en este sentido pueden por ello resultar ventajosas las soluciones que en la línea de los puentes integrales propician el monolitismo y la ductilidad estructural. Son sin embargo numerosos los esquemas que no apuntan en este sentido, lo que conduce a estrategias de diseño frente al sismo basadas frecuentemente en el uso de dispositivos amortiguadores capaces de reducir la energía que debe soportar la subestructura.

Algunos de estos dispositivos especiales pueden ofrecer también una vía de solución frente a la mencionada disyuntiva entre la conveniencia de apoyos rígidos para transmitir las fuerzas de frenado y la de apoyos deslizantes que permitan la libre dilatación o contracción del tablero sin afectar a la subestructura. Con ellos se busca dar cabida simultánea a ambos objetivos. Generalmente mediante mecanismos hidráulicos, los amortiguadores pueden permitir el libre desplazamiento del tablero sobre el apoyo



Alzado parcial del viaducto del Francolí, con uno de los sucesivos tramos integrales resaltado.

Imágenes comparativas de la habitual tipología de los viaductos en las líneas alemanas y la propuesta alternativa de Schlaich.

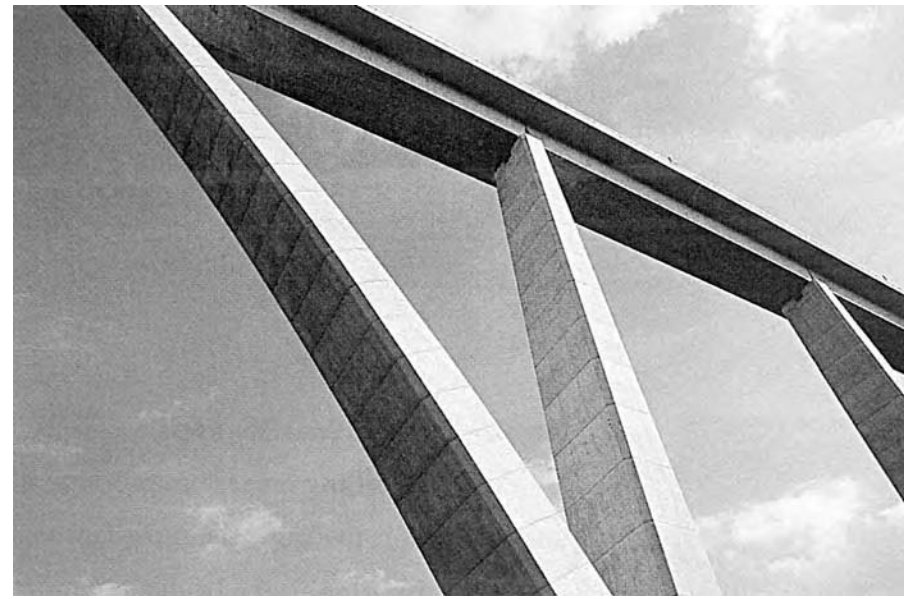


Los viaductos de Enz o del Arroyo de las Piedras emplean dispositivos antisísmicos para hacer frente a las fuerzas longitudinales por frenado o sismo.

cuando los movimientos son lentos, como en el caso de las deformaciones impuestas, y sin embargo se bloquean cuando el movimiento es brusco, es decir, ante el frenado o el sismo. Este es por ejemplo el esquema seguido en los viaductos de Enz en Alemania o del Arroyo Las Piedras en España, los dos con longitudes en torno al kilómetro. En ambos el tablero se fija a las pilas en su zona central, de tal forma que ante las deformaciones impuestas se parte la longitud dilatable de los largos tableros continuos, pero por otro lado cuentan también con sistemas de impacto y amortiguación ante el sismo en sendos estribos, que se clavan ante las cargas bruscas y las recogen descargando así a las altas pilas centrales.

Aunque la validez conceptual de estos dispositivos es innegable y puede ser, pese a su elevado coste, tentadora, no es menos cierto que este tipo de elementos parecen más propios de la ingeniería mecánica que de la ingeniería civil, siendo la vida útil de las creaciones de la primera de un orden inferior a la de las obras de la segunda. Conviene por tanto estar prevenido frente a los rigurosos y costosos requerimientos de seguimiento y mantenimiento de unos dispositivos no visibles que, quizás, nunca deban entrar en funcionamiento, y cuyas posibles disfunciones, por tanto, podrían con el paso de las décadas quedar desapercibidas. Probablemente por ello, en el viaducto de Enz se diseñaron las pilas centrales con unas condiciones de robustez y ductilidad suficientes para poder resistir todo el frenado ante el evento de un posible fallo en los dispositivos antisísmicos.

En este extenso repaso por algunos de los diversos esquemas longitudinales que adoptan a nivel continental los puentes contemporáneos del tren y que tan decisivos resultan para el adecuado comportamiento de una estructura ferroviaria, se ha pasado en cambio de puntillas por los aspectos morfológicos de los puentes del tren que como hemos visto están sólo indirectamente relacionados con el esquema longitudinal y que conviene, llegados a este punto, pasar a tratar específicamente



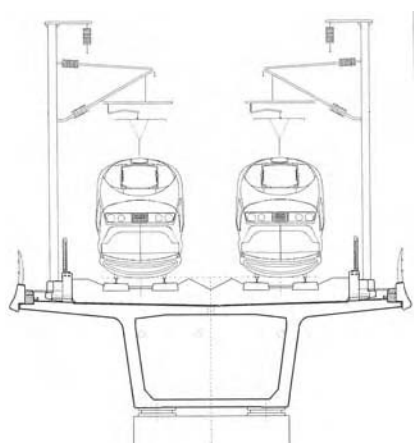
4.3 Morfología de los puentes del tren contemporáneos

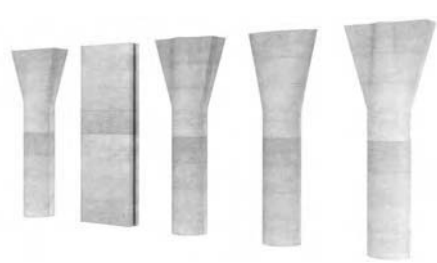
Al contrario de lo que sucede con los esquemas longitudinales, la morfología de los puentes del tren no guarda diferencias cualitativas con la de los puentes destinados a la carretera y, a nivel general, todas las tipologías y materiales habituales se han empleado y se seguirán empleando en ambos casos. Cuantitativamente, sin embargo, las diferencias pueden ser importantes pues los requerimientos particularmente exigentes del ferrocarril tienen lógicamente su reflejo en la morfología del tablero, como lo tienen en la marcada tendencia a emplear una u otra tipología.

Así, por ejemplo, hemos visto cómo lo elevado de las cargas ferroviarias en comparación con las de otros usos ha penalizado particularmente el uso de tipologías que trabajan por forma, como es el caso de los puentes arco o atirantados, acentuando en los puentes del tren la tendencia hacia la tipología de los puentes viga de tramo recto. Igualmente, las exigencias de rigidez y estabilidad dinámica han contribuido, en particular en España y no siempre justificadamente, a hacer prevalecer la robustez de las soluciones de hormigón frente a la ligereza de las metálicas o mixtas.

Sección transversal de un típico viaducto ferroviario en cajón unicelular (Inglaterra).

Análisis de alternativas morfológicas para pilas de altura moderada sobre un cauce, con base sensiblemente circular e incremento de anchura en cabeza.



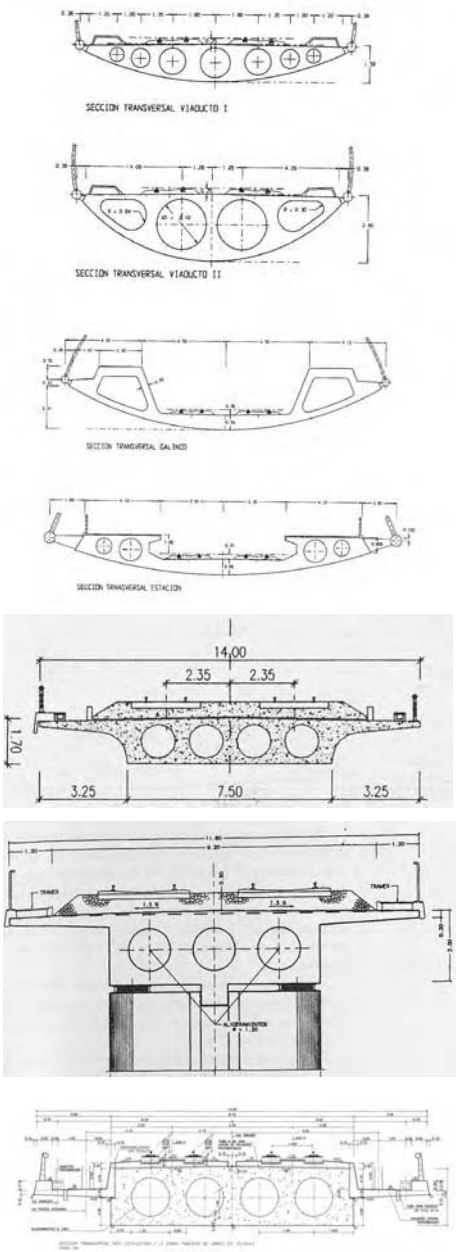


También dentro de una misma tipología las diferencias morfológicas en función del uso pueden ser sustanciales, ya sea por diferencias en la cuantía de la solicitación y las limitaciones deformacionales, que se traducen en unas esbelteces de los puentes ferroviarios sensiblemente menores que las de los carreteros, como por factores más obvios que tienen simplemente que ver con la menor anchura de la plataforma ferroviaria, si se compara con la de muchas calzadas, o con el hecho de que en los puentes del tren la posición de la carga esté transversalmente fijada en cada vía, lo que lógicamente no sucede con las sobrecargas de los puentes carreteros.

No está de más, por tanto, realizar en el presente apartado un breve repaso por algunas de las características geométricas y morfológicas fundamentales de los puentes del tren contemporáneos, diferenciando lógicamente entre las diversas tipologías que emplean más habitualmente y procurando recalcar los aspectos más específicamente relacionados con el tren. Repaso por la morfología de los puentes del tren que, por otro lado, no hace sino reunir y completar las referencias puntuales al respecto que ya se han venido haciendo al tratar sus más frecuentes métodos constructivos o sus esquemas longitudinales. No resulta necesario aclarar que los valores que siguen son de carácter genérico y se refieren sólo a las tipologías y luces más convencionales, por lo que conviene interpretarlos como puramente orientativos.

Pilas, estribos y cimentaciones, la subestructura en general, tienen características morfológicas muy variables, entre otras cosas por su gran dependencia de aspectos funda-

Ejemplos de diferentes tableros con losa aligerada.



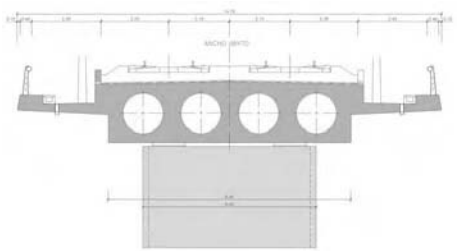
mentales como el esquema longitudinal, la propia altura de pilas o los condicionantes geotécnicos, e hidráulicos en muchos casos, que en mayor o menor medida dependen de cada caso y emplazamiento. Cabe diferenciar entre las pilas más altas, que suelen emplear la sección en cajón con paredes con espesores habituales de entre 40 y 60 cm, y las más bajas, generalmente macizas y con muy diferentes secciones, siendo una limpia y común la simple sección en tabique o también la circular en la base, imperativa por condicionantes hidráulicos en los cauces o en las llanuras de inundación. El diseño en cabeza debe prever la necesidad de sustituir los aparatos de apoyo cuando la unión con el tablero no es monolítica, y en la base y conexión con la cimentación, es siempre de especial relevancia el posible riesgo de socavación en los cauces y el diseño de la eventual protección de escollera. Muy variable y dependiente de cada caso es igualmente la morfología de los estribos, que van desde pequeños estribos abiertos en las laderas más suaves hasta los de geometría cerrada con muros laterales con la que se busca minimizar el derrame de tierras en laderas más escarpadas. Por supuesto, las formas del estribo y su cimentación se agigantan en el caso habitual en que deben actuar como punto fijo del tablero para recoger las importantes cargas longitudinales. Las características morfológicas de la subestructura, por esta gran variabilidad, se prestan poco a la descripción breve y generalista que se persigue en este apartado, que se centrará por ello más en la superestructura y sus diferentes formas o tipologías.

Con independencia de dichas tipologías, los viaductos hoy más habituales son los de doble vía, siendo mucho menos numerosos los puentes de vía única, que suelen limitarse a los ramales de enlace, o los puentes de más de dos vías, que se restringen en general al ámbito urbano y de proximidad a las estaciones. En España los típicos viaductos de doble vía para la alta velocidad tienen generalmente un ancho de 14 metros. En Francia la anchura habitual, que ronda los 12.5 metros, es bastante inferior, mientras que en Alemania está normalizado un ancho parecido al español de 14.3 metros. Estos valores son en general independientes de las diversas tipologías que puede adoptar el tablero.

Entre éstas, el rango de las luces menores está mayoritariamente cubierto por los puentes losa. Se trata de una solución de gran facilidad constructiva que se emplea con alta eficiencia estructural para luces de hasta 35-40 metros y para la que se recurre con generalidad a la construcción con cimbra o, en el caso de elevadas longitudes o alturas, con autocimbra. Es una solución de gran robustez, con una adecuada rigidez tanto a flexión como a torsión, que facilita posibles uniones monolíticas con la subestructura, y que permite esbelteces altas que suelen situarse entre 1/12 y 1/15 con hormigón armado y entre 1/15 y 1/20 con hormigón pretensado. Cabe situar la frontera entre la mayor competitividad del hormigón armado o del pretensado en valores de luz en

torno a los 15 metros. También en luces de este orden suele darse el salto de las losas macizas a las losas aligeradas, que acostumbran a considerarse imperativas a partir de cantos de 1.20-1.30 metros. Los aligeramientos de estas losas, generalmente de poliestireno expandido, suelen ser circulares, si bien en el rango alto de cantos se emplean también aligeramientos circulares suplementados o rectangulares achaflanados, con lo que se mejora la relación de aligeramiento (cociente entre el área hueca y el área maciza) pero puede reducirse en cambio la gran facilidad que esta tipología ofrece para la puesta en obra del hormigón.

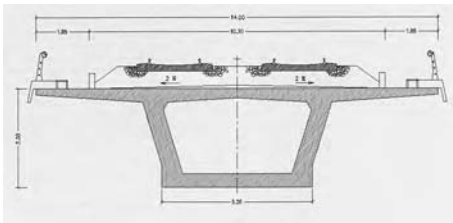
Viaducto de Cornellá con voladizos transversales rebajados que llevan a una mayor esbeltez aparente.

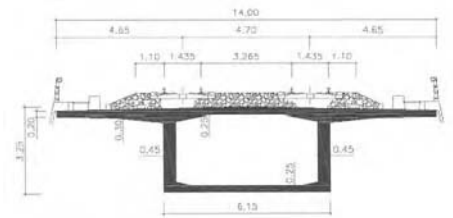


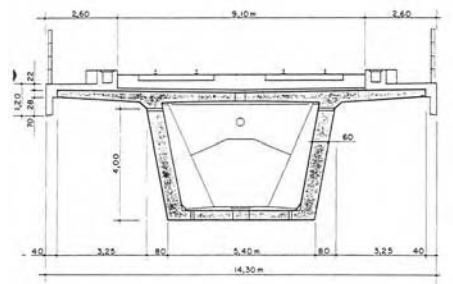
Las fuerzas de flotación de los aligeramientos en el denso hormigón fresco son muy elevadas y hacen de su correcta fijación a los encofrados uno de los más importantes aspectos constructivos de esta tipología. La demolición de este tipo de tableros ha mostrado en muchas ocasiones significativos desplazamientos de los aligeramientos con respecto a su posición teórica, lo que aconseja mantener siempre unas distancias mínimas de éstos a los paramentos superior o inferior que suelen rondar los 30 cm y no debieran bajar de 20. La separación entre aligeramientos o, lo que es lo mismo, el espesor de las almas entre ellos, debe permitir albergar los cables de pretensado, lo que suele ser un condicionante mayor que las propias necesidades resistentes. En el típico caso en que no hay más de dos cables por alma en una misma horizontal, espesores de 5 veces el diámetro de la vaina pueden ser suficientes, manteniendo siempre un valor mínimo de 30 cm. Todas estas consideraciones, en cualquier caso, no son particulares de los puentes para el tren.

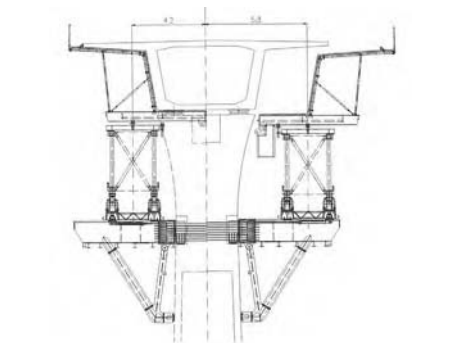
Sí puede serlo en cambio la geometría de la sección transversal que se adopte, además de por el canto, también en lo que se refiere a la relación entre el ancho del núcleo de sección aligerado y el de los voladizos laterales que habitualmente se disponen. Conviene asegurar que las cargas del tren, incluso una vez repartidas por el balasto, queden aplicadas sobre el núcleo de la sección para reducir así los esfuerzos transversales sobre los voladizos laterales, lo que, con separaciones entre carriles laterales de 6 metros o más, lleva en el típico tablero de dos vías a núcleos de la sección que suelen ser sensiblemente más anchos que en un tablero carretero de igual anchura total. Por otro lado, dado que en los puentes ferroviarios los voladizos laterales tan sólo dan apoyo a las labores de mantenimiento, y no al tráfico, cabe situarlos en un nivel inferior al del paramento superior de la sección, lo que lleva a soluciones de mayor esbeltez aparente sin perjuicio de su funcionalidad y sin afectar apreciablemente la eficiencia estructural de una sección que conserva una cabeza superior de compresión suficiente. Valores orientativos de las cuantías habituales en las losas aligeradas, por metro cuadrado de tablero, pueden estar entre 80-100 kg/m2 y 22-28 kg/m2 para los aceros pasivo y activo respectivamente.

Ejemplos de típicas secciones en cajón: Puentes del AVE empujado, con almas inclinadas, y por voladizos, con canto variable y almas verticales. Sección alemana normalizada. Típico esquema de construcción con autocimbra inferior.









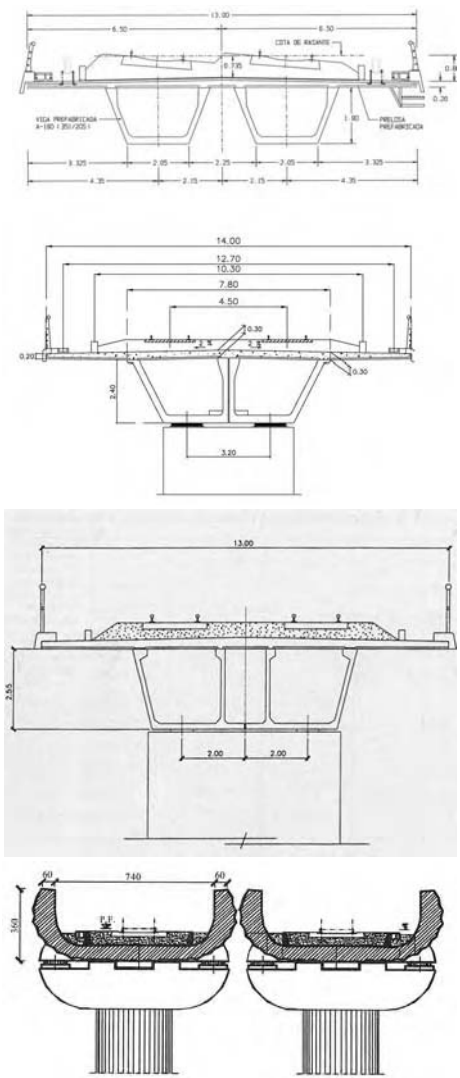
A partir de los 35-40 metros de luz, los puentes de hormigón en losa aligerada dejan de ser competitivos por su elevado peso propio, y se pasa en general a emplear la sección en cajón, que optimiza el rendimiento del material y permite alcanzar mayores cantos con similares ratios de m^3 de hormigón por m^2 de tablero que en las mayores losas aligeradas. Dicho ratio acostumbra a tener valores entre 0.75 y 0.90 m^3/m^2. El puente recto con sección en cajón es actualmente, como se ha visto, el puente de ferrocarril por antonomasia. Siendo la anchura del tablero limitada, con generalidad se adopta un cajón unicelular de mayor simplicidad constructiva. La inmovilidad transversal de las cargas del tren permite además controlar los esfuerzos transversales pese a la importante separación entre las almas que se sitúan convenientemente bajo cada una de las vías más próximas a los carriles exteriores.

La esbeltez de los tableros en cajón es algo inferior a la de las robustas losas y depende lógicamente del proceso constructivo y sobe todo del esquema estructural. En países como Alemania donde predominan los tableros isostáticos, no son infrecuentes esbelteces inferiores a 1/12. Los tableros continuos pueden obviamente ser más esbeltos, con valores que en Francia suelen estar en torno al 1/14 y que en España se han llevado algo más lejos siendo numerosos los viaductos empujados con relaciones canto/luz cercanos a 1/17. El canto se mantiene generalmente constante para luces por debajo de los 50-60 metros y siempre que la construcción es por empuje. Para luces, ya excepcionales, por encima de los 70 metros, lo más habitual es recurrir a un tablero de canto variable construido por voladizos sucesivos, con una esbeltez sobre pila con valores entre 1/12 y 1/14 que se reduce a valores del orden de la mitad en centro de vano.

La anchura inferior del cajón suele estar entre 5 y 5.5 metros. En Alemania y Francia están normalizados anchos de 5.40 y 5.50 metros respectivamente, y en España son algo menores, usualmente de 5 metros. Esta losa inferior tiene, salvo cortas cartelas, un canto transversalmente constante con valores de entre 30 y 40 cm, que sobre apoyos en puentes continuos puede aumentar hasta doblarse, para ganar cabeza de compresión. La losa superior, en cambio, es usualmente de espesor transversalmente variable, máximo sobre las almas, con valores de hasta 40-45 cm, y mínimo en el centro de la sección y los extremos de los voladizos, con valores no inferiores a 20 cm.

Las almas adoptan en general inclinaciones del orden del 10%, lo que aumenta su separación en cabeza y permite controlar la flexión transversal en los voladizos laterales. En lo que se refiere a su espesor, que puede ser variable para hacerse mayor sobre apoyos, valores de entre 50 y 65 centímetros son habituales, no siendo conveniente bajar de 45 por cuestiones de resistencia frente a cortante y torsión en apoyos, ni de 35 por cues-

Ejemplos de tableros prefabricados: doble viga artesa. Dos soluciones para las vigas artesas adosadas. Potentes vigas en U para cada vía.

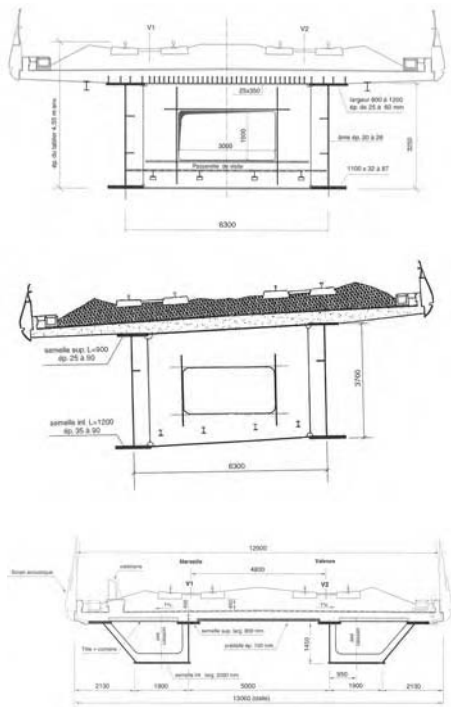


tiones constructivas. En cualquier caso, el alma deberá de nuevo ser de al menos 4-5 veces el diámetro de las vainas de pretensado en el caso habitual de tener que albergar en el alma parejas de cables transversalmente paralelos. Para las luces más convencionales de entre 40 y 60 metros, una orientación grosera sobre las cuantías de acero en cajones in-situ podría situarse entre 25-30 kg/m^2 y 100-115 kg/m^2 para los aceros activo y pasivo respectivamente, aunque en el caso del pretensado estas cifras son muy dependientes de las tensiones de tracción en el hormigón que se admitan para cada combinación de acciones en servicio.

Otro tipo de cajón es que el que se genera con las soluciones prefabricadas que emplean vigas artesas y que como hemos visto han desplazado en puentes de ferrocarril a los tradicionales tableros de vigas en doble T que tienen una escasa rigidez a torsión. En este caso se emplean dos artesas con lo que el tablero pasa a tener un doble cajón de paredes considerablemente más delgadas que en los cajones ejecutados in-situ, fruto de un mayor control en la fabricación industrial y del uso de hormigones de calidad mejorada, con los que se busca la decisiva ventaja que supone reducir el peso de las piezas prefabricadas de cara a su transporte y montaje. La losa superior in-situ es en cambio de espesor medio similar en tableros de vigas artesas o con cajón in-situ. Los viaductos prefabricados conformados por vanos isostáticos suelen ser poco esbeltos, con relaciones canto/luz en el entorno de 1/10 ó 1/12, y limitarse al rango menor de luces, por debajo en general de los 30-35 metros. Ya se ha expuesto como las soluciones de continuidad capaces de generar tableros hiperestáticos han permitido alcanzar mayores esbelteces, usualmente próximas a 1/14 ó 1/15, y también incrementar el rango de luces, con multitud de realizaciones con vanos en el entorno de los 40 metros y nuevos desarrollos de tableros con canto variable y prelosas realzadas que han permitido alcanzar luces de hasta 60 metros hoy todavía excepcionales para los puentes del tren con tablero prefabricado.

En lo que se refiere a los tableros metálicos, sobre todo franceses, la configuración bijácena es la mayoritariamente escogida; cubre luces hasta 60-70 metros, aunque en el TGV de Estrasburgo se está planteando un viaducto que alcanzaría los 80 metros. Tratándose de una solución abierta, su rigidez a torsión es menor, lo que lleva a separaciones entre las vigas de 6.30 metros, en torno a 1 metro superiores a la separación entre almas de los tableros de hormigón con cajón in-situ. Ello conduce a losas superiores de hormigón también algo mayores que las de los cajones de hormigón, con espesores máximos de entre 40 y 50 cm, y que además de actuar como cabeza de compresión y soportar la flexión transversal en los voladizos laterales y entre vigas, juegan un importante papel por la masa y capacidad de amortiguamiento que aportan a la estructura.

Ejemplos de tableros mixtos en Francia: bijáceno sin y con peralte y en doble cajón.



El canto de las vigas es tal que la esbeltez del tablero, incluyendo la losa, suele tener valores en torno al 1/14. Las vigas, de alma llena, van rigidizadas cada pocos metros y cuentan con diafragmas transversales distanciados del orden de 10-12 metros. El ala superior tiene un ancho que ronda los 800 mm y puede aumentar sobre apoyos, y en el ala inferior el ancho suele ser algo mayor y estar entre los 1.000 y 1.200 mm. Los espesores son elevados, llegando a emplear en los puntos de máximo esfuerzo chapas de hasta 100 mm o incluso 120 en el ala inferior. No se suele bajar de 25 mm en el ala superior ni de 30-40 en la inferior. También las almas requieren espesores elevados, sobre todo cuando la construcción es por empuje, que suelen variar entre los 20 y los 30 mm. Todo ello resulta en cuantías de acero elevadas, que a modo orientativo cabe situar entre los 260 y los 290 kg por metro cuadrado de tablero.

Es habitual que los tableros bijácenos cuenten con triangulaciones entre vigas en el plano horizontal de las alas inferiores, para mejorar el comportamiento a torsión y, desde un punto de vista más funcional, dar soporte a la plataforma de trámex que sobre ella se coloca para hacer el tablero fácilmente accesible e inspeccionable. En sustitución de esta rigidización y plataforma de trámex inferior se ha optado en ocasiones por disponer paneles prefabricados de hormigón solidarios con las alas, que cumplen por igual o incluso mejor las condiciones estructurales y de funcionalidad.

Cabe por último destacar, que aunque en Francia es habitual el uso de aceros de alto límite elástico (S 460 NL), raramente es éste el caso el los puentes del ferrocarril, pues en éstos los requerimientos de resistencia a fatiga obligan en cualquier caso a mantener rangos de tensión bajos para cargas en servicio, lo que dificulta el aprovechamiento, en estado límite último, de la mayor capacidad de los aceros de alto limite elástico.

Como no pocos de los puentes mostrados ejemplifican, entre todas éstas tipologías más comunes encuentran también esporádica cabida novedosas formas y esquemas estructurales que, en mayor o menor medida, y junto al continuado avance y optimización de las más convencionales, aportan dosis de progreso e innovación de cara al futuro de los puentes del tren. Futuro que tantas veces habrá de hacerse presente en las numerosísimas realizaciones de las próximas dos décadas y que en nuestra mano está saber hacer tan vanguardista e innovador como el pasado nos muestra que puede llegar a ser.

Un epílogo que mira al futuro

El peregrinaje, que ha tutelado Jose Serna, nos ha traído hasta las puertas del futuro, lugar propicio para hacer una última pausa que nos permita dialogar con los puentes, sobre los que circulan los trenes de hoy: con los más veloces y con los más parsimoniosos, con aquellos que transportan sólo mercancías –el proletariado ¡ay! poco valorado y atendido de nuestros trenes– hasta los más aristocráticos, puntuales y cómodos en los que viajan veloces y sin ruido –excepto el de los vociferantes teléfonos móviles–, viajeros privilegiados, para los que se están construyendo numerosas líneas que nunca parecen acabarse pero que pronto empezarán a hacerlo.

El futuro de los puentes del tren, como todos los futuros, está por inventarse y es tarea, poco menos imposible, adivinar qué les distinguirá de los que hoy se construyen. Nadie pudo imaginar, por ejemplo, en la frontera entre los siglos XIX y XX –cuando el tren se consideraba cosa del pasado y el futuro parecía ser patrimonio exclusivo de los coches que empezaban a nacer y que lo hacían, con los atributos de la libertad y de la posesión individual–, que el tren centenario renacería 100 años más tarde y se convertiría en el paradigma de la calidad en el transporte de viajeros, compitiendo ventajosamente con el coche y superando, en distancias cortas, las incomodidades del avión, cuya alada velocidad pareció dotarlo en sus orígenes de un atractivo insuperable.

Lo cierto es que si entreabrimos, con la delicadeza debida, la cancela que separa el presente que hemos alcanzado del futuro que nos aguarda, nos encontraremos, en opinión de algunos, ante una oscuridad que impide toda percepción. Otros pensarán, por el contrario, que será el sol del futuro quien nos recibirá con un resplandor deslumbrante obligándonos a cerrar los ojos. En todo caso, parecerá que el futuro quiere preservar su misterio, consiguiendo, en efecto, que tantos renuncien a pensar en él y al hacerlo se aferren al presente y se conformen contemplando los esplendores de un pasado que también tuvo futuro porque logró hacerse presente. Pero las transformaciones esenciales, que lograron que se hiciera presente lo que antes sólo era futuro incierto e ignorado, se produjeron porque hubo soñadores –lo que ahora llamamos innovadores– que convirtieron oscuridades en penumbras o filtraron luces deslumbrantes, desvelando un futuro ferroviario que podría ser habitado. Aquel futuro que vislumbraron e hicieron posible unos cuantos soñadores es nuestro presente. Pero es, al tiempo, prólogo de un futuro que tenemos que construir, antes que en ningún otro lugar, en nuestras propias mentes. No son las inercias, ni los hábitos, ni las burocracias, las que conducen al futuro. Lo que hacen, en todo caso, es prolongar el presente. Porque hacer futuro es muy complejo y para acceder a él hay que contar con realidades insoslayables sobre las que se tiene que influir sutilmente, con las limitadas fuerzas disponibles –que

suelen ser, en todo caso, las de la inteligencia y el conocimiento– para modificar el rumbo al final de un itinerario jalonado por la realidad del pasado.

De manera que llegados a este punto y en el umbral de la conclusión de un libro en que los puentes del tren han sido protagonistas, tratemos de conversar con ellos, pongámonos en su lugar, interesémonos por su descendencia, y escuchemos lo que en susurros –en el lenguaje de la ingeniería que es el suyo, porque fue el de quienes los gestaron– tienen que decirnos. Y lo primero que nos dicen es que no todas sus opiniones son coincidentes. Ni siquiera tienen clara la definición de futuro. Ni están seguros de que sus hijos atesoren en exclusiva el patrimonio del futuro. Porque, ¿no lo tendrán que compartir también con los hijos de sus hijos? ¿No habrá que esperar, incluso, hasta llegar a los biznietos para saber a qué se parecerá el futuro? Los más sabios entre ellos consideran que hijos, nietos y biznietos serán el futuro, desde luego. Pero que ellos también lo serán. Porque ellos, los puentes del tren, como los puentes viarios –y en general todas las infraestructuras– nacen llenos de salud y, a pocas atenciones que se les prodigue, son casi eternos. Por eso pueden convivir –y muy dignamente– aquellos que se gestaron hace muchísimos años con los que acaban de nacer, no siendo siempre cierto que los más jóvenes sean más robustos, ni estén más llenos de vida: ¡la vida de un puente!, hermosísimo concepto íntimamente relacionado con su utilidad. Porque los puentes viven mientras prestan un servicio y mueren cuando dejan de hacerlo. Su vida es servicio. No nacen para ser admirados, aunque algunos sean admirables. Ni nacen tampoco para ser servidos: nacen para servir y viven sirviendo.

Reflexionar sobre el futuro de los puentes del tren se convierte, así, en un ejercicio de demografía, en una indagación sobre los orígenes de su fertilidad, las causas por las que se reproducen y los modos de su reproducción. La causa reproductora es, ciertamente, su utilidad: se gestan porque se les desea, nacen para atender necesidades de los seres humanos que, al cabo, son sus progenitores. Son fruto de la fertilización cruzada de experiencias y conocimientos acumulados. Y, al serlo, son consecuencia de una evolución que, a su vez, ha sido el motor del progreso de la humanidad que ha progresado.

¿Cómo serán los puentes del futuro? Sus ancestros fueron primero de piedra, los más perdurables. Muchos, de los que no tenemos siquiera noticia, fueron de madera, el material más asequible pero más vulnerable. En tiempos ya recientes –doscientos años no son demasiados para ellos– se empezaron a construir con hierro y aceros elementales. Cien años después, hace unos cien años por tanto, se descubrió el hormigón armado. Y más recientemente, el prodigioso hormigón pretensado que acaparó durante décadas la construcción de los escasos puentes de ferrocarril que se tuvieron que

construir, para reemplazar los que fueron dañados por la destructora II Guerra Mundial. El acero, profundamente mejorado, contribuyó también en los años de la post-guerra al nacimiento de algunos puentes, en general, los de más envergadura. Y desde los años setenta, las estructuras mixtas –juiciosa cooperación de acero y hormigón, ambos a la vista y cumpliendo cada cual las misiones para las que están mejor preparados–, fueron también escogidas para la construcción de numerosos puentes.

Pero, ¿cómo serán los puentes del futuro?, ¿cuáles serán los materiales con los que, preferentemente, serán construidos?, ¿cuáles los procedimientos de construcción?, ¿cuáles sus tipologías estructurales? ¿Serán más largos, más altos, más anchos que los puentes actuales del tren? ¿Tendrán que serlo? ¿Habrán evolucionado los procedimientos para dimensionarlos? ¿Se mantendrán invariables los límites que controlan su dimensionamiento? Pero todas estas cuestiones, tan importantes, no lo son tanto como las que inevitablemente hay que formular: ¿serán necesarios más puentes del tren en el futuro?, ¿cuántos más?, ¿qué entendemos por futuro ferroviario?

Tratemos de esbozar algunas respuestas imposibles a cuestiones que merecen, sin embargo, el milagro de una respuesta. Y empecemos, tal vez, por las más fáciles.

Es siempre tentador imaginar el futuro construido con materiales diferentes de los que hoy existen, que permitirían estructuras eficientes, ligeras, perdurables, tolerantes al daño, económicas, infatigables, que ofrezcan una gran libertad para concebirlas. Materiales que conformarían puentes de geometrías nunca vistas, tipologías verdaderamente innovadoras, procesos constructivos altamente industrializados, pesos menores con resistencias mayores. Materiales sin posibilidades de ser dañados por oxidaciones, vibraciones, fatigas, fisuraciones y tantos otros males que acechan a los puentes del tren construidos con los materiales de hoy. Es posible que así sean realmente los revolucionarios materiales del futuro. Pero ¿es lo más probable?

Como el pan y el vino, productos eternos y que continúan siendo alimentos de los seres humanos desde que fueron inventados, el acero y el hormigón continuarán estando presentes en las construcciones del futuro. Aunque no serán los mismos aceros y hormigones que hoy utilizamos, que ya son bien diferentes y mucho más eficientes de los que fueron utilizados por nuestros sabios e intuitivos predecesores en obras emblemáticas del pasado.

Ciertamente, la evolución de los materiales estará asociada a transformaciones en la concepción y procedimientos de construcción de los puentes del futuro que se adecuarán a los atributos de los materiales evolucionados para obtener el mayor provecho de ellos.

Los materiales compuestos tendrán sus aplicaciones específicas. No es probable, en este campo, que sus costes mayores estén compensados por sus atractivos sobresalientes. Ni es tampoco probable que los aluminios, titanios y aleaciones avanzadas utilizadas, por ejemplo, en la aeronáutica y para la conquista del espacio –que, tal vez, pueda equiparase a la que fue épica conquista del Oeste americano– sean alternativas generalizadas: su elevado coste, difícilmente estará contrarrestado por su ligereza y por el atractivo de sus envidiables cualidades.

Porque el peso del hormigón no siempre es un inconveniente. Y, en todo caso, los costes de hormigones y aceros continuarán siendo muy competitivos. No lo será, por el contrario, el coste de los operarios y especialistas esenciales para conformar aceros y hormigones que configurarán los puentes del futuro. Tal vez los hormigones de mañana no necesiten armaduras, activas o pasivas. Tal vez los hormigones con fibras tengan una presencia mayor. Tal vez los aceros se puedan soldar con el calor de una mirada. Tal vez.

Pero hay otras reflexiones sobre el futuro dignas de ser expuestas. Porque, acaso al renacimiento del tren en el que estamos inmersos le siga otra época sin nuevas líneas ferroviarias ni nuevos puentes. Porque el progreso se produce a impulsos. Es probable que la localización de las construcciones ferroviarias, de aquí a 30 años, se desplacen geográficamente desde los opulentos países occidentales demográficamente estancados (-6% en las previsiones de crecimiento de Europa y sólo un 35% en Estados Unidos frente a más del 100% en África) hacia países que tienen todo por hacer y en los que la población crecerá enormemente. Pero las características de los puentes dependen, en buena medida, de los lugares en los que se construyen. Tipologías y materiales adecuadísimos para los puentes de la Europa actual, no lo serían desde luego para los de África, China o en otros parajes del mundo, en donde la mano de obra es abundante y muy barata, y la tecnología y las industrias auxiliares son muy precarias. Es decir, que están en situaciones como las que podíamos estar nosotros hace cincuenta o cien años. Y, al hilo de esta reflexión no está de más recordar las exquisitas y eficientísimas estructuras laminares de hormigón, que hoy prácticamente han desaparecido. Por entonces el material era escaso y costoso, mientras que la mano de obra era abundante y barata. En la actualidad ocurre lo contrario, lo que hace inviable la construcción de este tipo de estructuras, de las que sólo nos quedan, y a veces sólo en imágenes, las que fueron construidas hace décadas.

Por todo ello, cuando hablamos del futuro nos arriesgamos además a ser imprecisos: porque el futuro no es solamente tiempo, es también geografía. Y en un mundo, por globalizado que esté, nos encontraremos con situaciones muy diferentes que justifica-

rán soluciones que para nosotros serán tradicionales y escasamente innovadoras. Pero, además, tampoco es innovador todo lo que reluce en los países más prósperos del presente. Porque, el valor mediático de la imagen parece estimular soluciones a veces llamativas y originales en apariencia, pero retrógradas y confusas en su concepción. Como son, creo yo, las imágenes de algunos puentes modernos de tren en la, por muchas razones, admirable Francia, que no son fruto nacido de la innovación sino consecuencia de un desconcertado presente.

Es cierto, también, que los que se construyen hoy son puentes para el futuro. Pero no son el futuro que sería deseable y que tendría que nacer de la evolución del conocimiento y de la busca del progreso. Y es que, con frecuencia, sus concepciones, sus tipologías, sus materiales se han inspirado en el pasado más notorio.

Por otra parte, suelen ser las grandes construcciones las que se visten con las galas del futuro porque plantean problemas nuevos, que no habían sido planteados antes. Pero no parece vislumbrarse, en las próximas décadas, nuevos puentes de grandes luces para el tren. El que podríamos tener más próximo, el del Estrecho de Gibraltar, para unir nada menos que dos continentes, en el encuentro entre dos mares, no lo será. Porque, parece que se está apostando por un túnel ferroviario como cordón umbilical entre África y Europa.

Otro gran puente, el del Estrecho de Messina –que tras tantos amagos de inicio de construcción parece haber abortado también su último despegue–, no será específico del tren. Como, por otro lado, ya ha ocurrido y ocurrirá con las grandes comunicaciones internacionales. Así el puente del Grand Belt, con tablero construido en astilleros de Cádiz y trasladado por flotación a su destino geográfico, entre Dinamarca y Suecia, tiene dos tableros: el superior dedicado a vehículos y el inferior al tren. Además, puentes de esta envergadura, son utilizados para soportar el paso de importantes instalaciones de energía, telecomunicaciones y servicios. En grandes puentes es probable que la especialización se haya acabado y que, por el contrario, la plurifuncionalidad sea el objetivo perseguido porque, al tiempo, contribuye a justificar económicamente su construcción. Tal vez, otro tanto deberá ocurrir con las grandes infraestructuras terrestres, que tendrán que compartir en el futuro, más de lo que se ha hecho hasta ahora, diversos modos de transporte, y conducciones de agua, de gas, de electricidad y telecomunicaciones. Todo se andará, y parece que el día en que tal cosa ocurra está cada vez más próximo.

En el panorama de los avances tecnológicos de los ferrocarriles, quizás el más innovador sea el tren magnético, que "vuela bajo", deslizándose sobre un colchón de aire electrizado, sin necesidad de balastos, traviesas, vías-placas y carriles. Este concepto ferro-

viario que se inició hace más de veinte años, pugna por justificar su presencia en las grandes líneas de alta velocidad ferroviaria, alcanzando velocidades de 500 ó 600 Km/h. Pero desde el punto de vista de este libro nos encontramos, en cierto modo, con el no-puente, porque con dicha tecnología los trenes sólo necesitan ser guiados y se conforman con la construcción de guías, para lo que se requieren estructuras muy sencillas, de luces reducidas y alturas moderadas, con aspecto de lombriz elevada que produce sonrisas benevolentes y comentarios socarrones en los veteranos y robustos puentes de trenes convencionales, con los que hemos podido dialogar al respecto.

Pero, en todo caso, si, ciertamente, los grandes puentes del futuro impulsaran materiales, tipologías y tecnologías innovadoras tendrán que ser en los nuevos puentes de apariencia convencional –que continuarán siendo los más numerosos–, donde existirá el más realista y próximo espacio para la innovación, que es donde habita el futuro.

En los próximos veinte o treinta años el gran impulso que está recibiendo la construcción de nuevas líneas para los trenes de largo recorrido y de altas prestaciones habrá remitido en los países más avanzados que son los que, en todo caso, han impulsado hasta ahora el progreso tecnológico. Y, en tal sentido, cabría preguntarse, en el crepúsculo de un libro como éste, si en nuestros puentes del tren –que podríamos denominar tecnológicamente convencionales por estar utilizando tecnologías que tienen ya 50 años de vida– hay resquicios para la innovación y, en caso afirmativo, podríamos preguntarnos también si existen cauces adecuados para incorporar soluciones innovadoras a los puentes que vamos a proyectar y construir en las próximas décadas, período en el que probablemente se concluirá lo esencial de la construcción de las infraestructuras ferroviarias que estarán en servicio los próximos cien o más años.

A ellos, a los puentes "convencionales" del tren, que nos mantendrán muy atareados en los próximos tiempos y están ya ocupando nuestro presente profesional, dedicaremos las últimas páginas de este epílogo que mira al futuro.

Comencemos observando que, aquí en España, uno de los países europeos que más destacan en la modernización de sus infraestructuras ferroviarias, están previstas unas inversiones extraordinarias del orden de 120.000 millones de euros hasta el 2020 para el conjunto de las nuevas redes. Y de estas inversiones, una parte significativa, que tal vez supera el 15%, es decir los 18.000 millones de euros, se destinará a la construcción de nuevos puentes y viaductos. Ello implicará una inversión anual del orden de 1.200 millones de euros durante los próximos quince años en este tipo de infraestructuras, lo que puede suponer la construcción de más de 6.000 puentes grandes, medianos y pequeños en este periodo. Porque los puentes ferroviarios reclaman una parte significativa del presupuesto y de la atención que necesita la gestación de las nuevas infraes-

tructuras ferroviarias. Y plantean problemas en su concepción, proyecto, construcción y mantenimiento que con los conocimientos del pasado no se pueden resolver acertadamente.

Y esto es así porque realmente los puentes del tren tienen unas exigencias distintas de los otros tipos de viaductos, y en particular, de los de puentes de carretera, que son los que con más frecuencia se construyen. Y porque, además, los puentes modernos de ferrocarril no son como los puentes de antaño. Son realmente diferentes y para confirmar tal juicio bastará recordar los puentes decimonónicos que permitían el tránsito parsimonioso de convoyes arrastrados por máquinas jadeantes envueltas en la humareda de su aliento.

Los puentes del tren construidos en los últimos años son realmente jóvenes y poco experimentados. Su juventud explica que, en determinados aspectos, no existan conocimientos que siendo tal vez suficientes (lo sabremos con el paso de los años) no son, en todo caso, los que deberían existir para formar parte del bagaje intelectual de quienes los conciben, proyectan, construyen y mantienen. Es cierto que, los numerosísimos puentes del AVE que acercaron para siempre Sevilla y Madrid, son ya quinceañeros. Pero por tratarse de una línea pionera y debido también a las urgencias expositivas que acunaron su gestación, no se pudo aprovechar, en la medida que hubiese sido deseable, las posibilidades de progreso tecnológico en cuestiones estructurales.

Se da, por otra parte, la circunstancia, digna de ser subrayada, de que en los últimos años con la proliferación de nuevas líneas de alta velocidad ferroviaria, se están construyendo en nuestro país numerosos puentes ferroviarios, pero se están proyectando muchísimos más. Entre todos ellos sólo un porcentaje pequeño ha entrado en servicio y aún con trenes circulando a velocidades limitadas (nos estamos refiriendo a la línea Madrid-Zaragoza-Lleida, que lleva años pugnando por alcanzar Barcelona). Por consiguiente, no se pueden sacar todavía experiencias sobre cuestiones que son de una importancia extraordinaria. Así, la envergadura de los esfuerzos de frenado y arranque caracteriza los puentes del ferrocarril y, en cierto modo, es un reto que tienen que resolver ellos solos. También son específicos de ellos las exigencias de rigidez estructural, de tal manera que los esfuerzos y deformaciones provocadas por el paso de los convoyes ferroviarios sufran tolerables amplificaciones y las vibraciones asociadas se sitúen en rangos aceptables.

La gran longitud de los viaductos ferroviarios modernos y la altura limitada de sus pilas los distinguen también de sus homólogos viarios e influyen en su concepción y dimensionamiento.

Por consiguiente, que las reflexiones y análisis imprescindibles acerca de los puentes de ferrocarril llevan consigo una indagación sobre las tipologías que se están utilizando en la actualidad, si es lógico que sean las mismas que se utilizan en puentes de carreteras o tienen que ser de alguna manera diferentes. Exige plantear en qué medida la longitud de los viaductos ferroviarios y la altura moderada de sus pilas condicionan las soluciones estructurales, y cuales son los umbrales para recurrir eficientemente a unas tipologías y descartar otras. Demanda, al tiempo, estudios avanzados acerca de la atribución de rigideces verticales y horizontales –tanto en el sentido del eje del puente, como en el perpendicular a él–, para asignar con criterio ingenieril el reparto de las cargas horizontales entre tablero, pilas y estribos. Reclama el análisis de la influencia de la fisuración en los tableros y en las pilas de puentes, en la variación de sus rigideces instantáneas y su evolución en el tiempo. Obliga, también, a indagar acerca del comportamiento de secciones de hormigón armado o pretensado solicitadas por esfuerzos alternados y, por consiguiente, la evaluación de los riesgos de fatiga de bajo y alto número de ciclos. Lo que, a su vez, está relacionado con la definición de las cargas que impone la normativa vigente y que, en algunas circunstancias no parecen ser las más adecuadas para expresar el comportamiento interdependiente del convoy ferroviario y de la estructura que lo tiene que sustentar.

Relacionado con lo anterior, pero con su propia especificidad, se encuentra también la cuestión de las vibraciones, de su origen, de la evaluación de la respuesta y de los límites a respetar, lo que no parece estar adecuadamente tratado en la normativa vigente. Como tampoco están incuestionablemente establecidos los insuperables límites de desplazamientos, horizontales y verticales, de los giros rotacionales y de los alabeos del tablero que se imponen en la actualidad y que, en algunos casos y para algunas tipologías, obligan a descartar el uso de determinadas soluciones que podrían ser, sin embargo, muy adecuadas y eficientes y, al hacerlo, coartan nuestra libertad profesional.

Las potenciales ventajas del monolitismo estructural en puentes, la eliminación o reducción de aparatos de apoyo y de aparatos amortiguadores –que están proliferando, tal vez, en demasía– justificaría también una atención mayor en la concepción y definición de detalles esenciales en zonas singulares de la estructura: las conexiones de pilas y tableros, de las pilas con sus encepados y de éstos con sus eventuales pilotes que, en ocasiones, tienen que transmitir significativos esfuerzos horizontales; el encuentro del tablero con el estribo y la solución de la delicada frontera entre terraplén o desmonte, estribo y tablero; la concepción de la losa de transición, su posición óptima, su geometría, su armado, su integración con el entorno estructural y no estructural.

Otro campo de reflexión, que podría alumbrar propuestas alternativas a las que son

hoy más usuales, es el relacionado con la tipología de las pilas, que podrán ser, como es lo habitual en la actualidad, de hormigón armado. Pero, a veces, podrían ser también metálicas o mixtas. Lo que, a su vez, genera una pléyade de detalles esenciales, para cuya concepción y dimensionamiento existe muy poco especificado en la normativa vigente o escrito en la literatura especializada. El uso de pilares prefabricados de hormigón es otro campo de gran interés que está prácticamente por explorar. La geometría y dimensiones de las piezas que pueden configurar una pila prefabricada y la solución de los nudos que aseguren un monolitismo deseable en la pila concluida, así como los diferentes detalles y problemas específicos asociados a la prefabricación son otros aspectos que requieren miradas diferentes e innovadoras, que profundizarán en cuestiones fundamentales de unas construcciones esenciales como son los puentes ferroviarios que, aun cuando algunos puedan parecer veteranos, son de una gran juventud. Porque los del mañana van a requerir cualidades muy diferentes de los construidos hasta ahora para atender demandas que ya son diferentes. La alta velocidad y los progresos tecnológicos asociados exigen puentes distintos y, en la evolución rauda que se está produciendo, brota la necesidad de precisar conocimientos ya existentes y de alumbrar otros nuevos. Campo propicio, por tanto, para la innovación auténtica.

Este vertiginoso y atractivo peregrinaje por los puentes del tren, por su fascinante y tan presente pasado y por esbozos de un hipotético e insoslayable futuro, entra en agujas de la Estación Término de su destino. Y al despedirnos –un hasta luego– de los viajeros –queridos lectores– que nos han acompañado, podemos observar de nuevo que el futuro ferroviario está lleno de esperanzas ingenieriles; porque nunca habían estado previstos tantos puentes del tren.

En sus orígenes los puentes decimonónicos fueron gestados por una saga excepcional de ingenieros ingleses, Steveson, Brunel, Telford… Pero los grandes ingenieros del siglo XX, los Maillart, Finsterwalder, Freyssinet, Torroja, no han dejado la huella de su genio en puentes ferroviarios. Porque el siglo XX, siglo de guerras y de destrucciones, no fue propicio para el tren. Pero el siglo XXI vuelve a serlo y debe pertenecer a las nuevas generaciones de jóvenes ingenieros, como Jose Serna, apasionados por la ingeniería del presente, porque conocen y comprenden profundamente la ingeniería de un pasado fascinante y apuestan por un porvenir en el que por su sensibilidad, conocimientos, creatividad y capacidad de trabajo serán protagonistas.

JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA

JOSÉ SERNA GARCÍA - CONDE

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos titulado por la UPC de Barcelona en la promoción del año 2001, con la doble especialidad en Análisis y proyectos de estructuras y en Tecnología y construcción de Estructuras. Desde Octubre 2001 forma parte de la plantilla de ESTEYCO, trabajando en el departamento de estructuras en proyectos y obras de infraestructuras y arquitectura avanzada, incluyendo varios viaductos ferroviarios como los de Cornellá o el Francolí. Desde el año 2004 desempeña tareas de Jefe de Proyecto. Ha sido director de obra y formado parte de varios equipos de asistencia técnica en obra como responsable de ingeniería estructural (Pasarela peatonal sobre el Río Segre, Túnel de Can Tunis, Bancada para el ensayo de palas de aerogeneradores del CEDEX). En particular estuvo destacado cuatro meses en la obra del Edificio Forum en Barcelona, en labores de supervisión y análisis de la estructura y seguimiento de la fase critica de su ejecución (2003). Es también Director de Innovación y Desarrollo de InnEO, empresa especializada en el desarrollo, fabricación y construcción de torres eólicas de hormigón prefabricado para altas prestaciones energéticas. Ha dirigido para innEO procesos de certificación internacionales y diversos programas de experimentación en colaboración con el laboratorio de estructuras de la UPM y APPLUS. Miembro del equipo investigador propuesto para desarrollar el proyecto "Puentes modernos de ferrocarril: retos y necesidad de innovar", presentado en la convocatoria del CEDEX (Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007, cuyo investigador principal es Javier Rui-Wamba). Como formación complementaria ha participado en numerosos cursos de especialización, Jornadas Técnicas y Congresos de ingeniería nacionales e internacionales (IABSE, diseño de puentes. CEDEX, muros pantalla, micropilotes o anclajes al terreno. BIBM International Bureau for Precast Concrete congress, London Imperial Collage, Post Tensioning Design and Construction. RAILFORUM, Superestructura de vía). Es también autor de varios artículos para congresos (CEA 2004 y ACHE 2005) y ha participado como ponente en el congreso de la Estructura de Acero (Universidad de A Coruña 2004), "Aproximaciones a la Arquitectura de las Estructuras de Acero" y en el Congreso de Puentes y estructuras de edificación de ACHE, "Las estructuras del viento" (Zaragoza 2005). Ha sido Conferenciante único de la "1ª Reunión de Jóvenes Ingenieros de Estructuras" (Colegio de Ingenieros de Caminos. Marzo 2004) y Profesor invitado en el Master de Arquitectura "La Gran Escala" (2005), "Infraestructuras de la Energía". Además desarrolla actividades de tutoría académica y tutoría externa de Proyectos de Final de Carrera.

MERCEDES LÓPEZ GARCÍA

Profesora titular de Historia y Estética de la Ingeniería en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, vicepresidenta de la TICCIH-España (The International Committee of Conservation of Industrial Heritage) y académica correspondiente de la Real Academia de Bellas Artes de la Purísima Concepción de Valladolid.

Nominada "Prix Femmes d´Europe" en 1990. Especialista en temas de ferrocarril, ha publicado varios libros sobre el tema, MZA Historia de sus Estaciones (1986), su tesis doctoral, editada por el Colegio de Ingenieros de Caminos y la Fundación de Ferrocarriles Españoles con una 2ª edición en el 2005, Puerta de Atocha (1992) Ed. Lumwerg, La vía estrecha en Asturias. Ingeniería y construcción (1844-1972), Ed. Gran Enciclopedia Asturiana (1995); Les gares d´Espagne en la obra dirigida por Jean Dethier: Gares D´Europe. Ed. Denoël (1988); y con Jorge Bernabeu 50 años construyendo el futuro: Ingeniería e Infraestructura en España 1955-2005, editado por Constructora Hispánica (2005), además de artículos, conferencias, seminarios, dirección de investigaciones como la del IPEX (Inventario de Puentes de Extremadura), etc., organizando Congresos Internacionales sobre Investigaciones ferroviarias en Paraguay con ALAF en 1996, o la ponencia magistral en el VII Encuentro del Ferrocarril en Monterrey, México, 2004. Experta también en temas de Patrimonio Industrial, dirige la realización del IPICAM (Inventario de Patrimonio Industrial de Madrid) 2000-2006, publicando con J.J. Castillo y P. Candela, en 2002, Arqueología Industrial y memoria del trabajo: el patrimonio industrial del sudeste madrileño, 1905-1950, Ed. Doce Calles y dirigiendo en 1992 el VIII Congreso Internacional de la TICCIH en Madrid sobre El Patrimonio Industrial y la Obra Pública, o un Curso de verano en El Escorial para la Universidad Complutense (2003), así como investigaciones colaborando con organismos de la Administración y empresas como RENFE, FEVE, Eurocontrol S.L., Constructora Hispánica, Fundación Esteyco, Fundación Almadén, Fundación Dragados, Fundación de Ferrocarriles Españoles, ALAF, CEHOPU, etc.

JAVIER RUI - WAMBA MARTIJA

Nacido en Gernika en septiembre de 1942. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos a los 23 años, por la Universidad Politécnica de Madrid. Trabajó en Cubiertas y MZOV en el proyecto y construcción de los puentes del Plan Sur de Valencia. En 1969, durante un año, fue ingeniero de la oficina de Freyssinet en París. A su vuelta, en enero de 1970, fundó la Sociedad de Ingeniería Esteyco, en la que desde entonces ha desarrollado sus actividades profesionales, dirigiendo a un equipo pluridisciplinar, en la actualidad con 70 personas en Madrid y Barcelona, que ha realizado más de 800 proyectos y direcciones de obras de todo tipo de estructuras, obras civiles y arquitectura. Durante 17 años fue profesor de Estructuras y Puentes Metálicos en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, hasta 1991. Fue también profesor honorífico de la Universidad Politécnica de Cataluña. Ha sido presidente de la Asociación Española de Consultores en Ingeniería (Asociación Nacional miembro de Fidic, Efca y Fepac), miembro de honor de la ATEP, medalla de la ATEP por la contribución al desarrollo del hormigón pretensado en España, premio Construmat 1993. Medalla al mérito profesional del Colegio Nacional de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, y conferenciante invitado en Argentina, Francia, Uruguay y España. Miembro numerario de la Real Academia de Ingeniería (Marzo 1997). Académico Correspondiente de la Real de Bellas Artes de San Fernando (Julio 2002). Preside la Fundación ESTEYCO, que fundó en 1991.

FERNÁNDEZ TROYANO, L.

"Tierra sobre el agua. Visión Histórica Universal de los Puentes"

Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1999

ARENAS, J. J.

"Caminos en el aire"

Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 2002

PULIDO, D.

"Puentes de Ferrocarril. Proyecto, Construcción y Mantenimiento"

Grupo Español IABSE, 2002

GARCÍA MATEO, J. L.

"Inventario de Puentes Ferroviarios de España"

Fundación de los Ferrocarriles Españoles y Ediciones Doce Calles S. L. Madrid, 2004

MANTEROLA ARMISÉN, J.

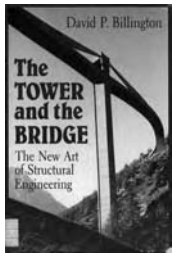
"Puentes. Apuntes "

Madrid

LÓPEZ PITA

"Infraestructuras Ferroviarias"

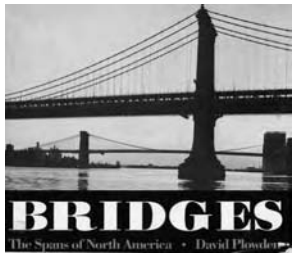
Ediciones UPC. España, 2006



BILLINGTON, D.P.

"The Tower and the Bridge. The New Art of Structural Engineering"

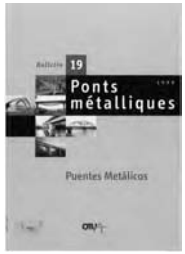
Princeton University Press, 1983



PLOWDEN, DAVID

"Bridges. The spans of North America"

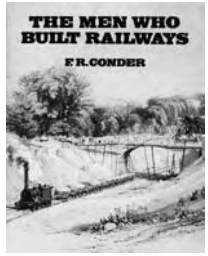
W.W. Norton & Company, 1974



"Ponts Métalliques"

Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier, OTUA

Bulletin 19. 1999



CONDER, F.R.

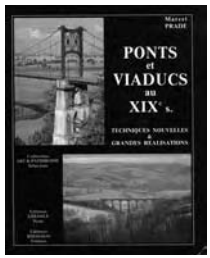
"The men who built railways"

Thomas Telford Ltd, London, 1983

MARREY, B.

"Les Ponts Modernes"

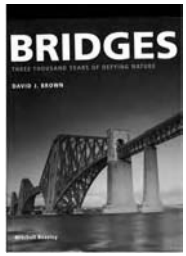
Picard Editeur, 1990



PRADE, M.

"Ponts et Viaductes au XIXe s."

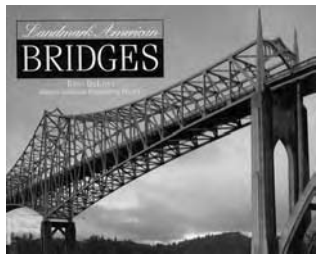
Editions BRISSAUD. Poitiers, 1988



BROWN, B.

"Bridges. Three thousand years of defying nature"

Octopus Publishing Group Ltd. London, 1993



DELONY, E.

"Landmark American Bridges"

Library of Congress Catalog

Mackay, S.

"The Forth Bridge. A picture story"

Moubray House Publishing. Edinburgh, 1990

La presente publicación ha sido realizada por

la fundación esteyco

bajo la coordinación editorial y

el diseño gráfico de

pilar carrizosa.

La fotocomposición, fotomecánica e impresión gráfica

ha sido realizada en artes gráficas palermo, madrid.

PUBLICACIONES DE LA FUNDACIÓN ESTEYCO

PABLO ALZOLA
LA ESTÉTICA DE LAS OBRAS PÚBLICAS
ESTETICA HERRI-LANETAN (agotado*)

LUCIO DEL VALLE
MEMORIA SOBRE LA SITUACIÓN, DISPOSICIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LOS PUENTES. 1844. (agotado*)

EN TORNO A LEONARDO TORRES QUEVEDO Y EL TRANSBORDADOR DEL NIÁGARA (agotado*)

JULIO CANO LASSO
CONVERSACIONES CON UN ARQUITECTO DEL PASADO

CARLOS FERNÁNDEZ CASADO

JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA
AFORISMOS ESTRUCTURALES / STRUCTURAL APHORISMS

MARIO ONZAIN
LA RÍA DE BILBAO

ANTONIO FERNÁNDEZ ALBA
ESPACIOS DE LA NORMA. LUGARES DE INVENCIÓN. 1980-2000

JOSÉ LUIS MANZANARES
LAS PUERTAS DEL AGUA

LAS GEOMETRÍAS DEL TREN / LES GEOMETRIES DEL TREN

EUGÈNE FREYSSINET. FRANK GUYON. JAVIER RUI-WAMBA Y ANTONIO F. ALBA
EUGÈNE FREYSSINET
UN INGENIERO REVOLUCIONARIO / UN INGÉNIEUR RÉVOLUTIONNAIRE

MIGUEL AGUILÓ. JAVIER MANTEROLA. MARIO ONZAIN. JAVIER RUI-WAMBA
JAVIER MANTEROLA ARMISÉN. PENSAMIENTO Y OBRA

PABLO OLALQUIAGA. ALFONSO OLALQUIAGA
EL LIBRO DE LAS CURVAS

* Los libros agotados se encuentran disponibles en www.esteyco.es

FUNDACIÓN ESTEYCO
Menéndez Pidal, 17. 28036 Madrid. Tel. 91 3597878. Fax 91 3596172
e-mail: fundacion@esteyco.es – web: www.esteyco.es

FUNDACION
ESTEYCO