EVOLUCION DE LOS PUENTES EN LA HISTORIA RECIENTE*

(THE RECENT HISTORY OF THE EVOLUTION OF BRIDGEBUILDING)

Javier Manterola, Prof. Dr. Ingeniero de Caminos

560-25

RESUMEN

La aparición de aceros y hormigones de alta resistencia, la posibilidad de utilizar, a nuestra conveniencia, parte de las acciones que solicitan el puente, las morfologías nuevas como la losa ortótropa para los puentes metálicos o el atirantamiento de los tableros y el desarrollo de nuevos procesos constructivos, han introducido una fuerte aceleración en la evolución de los puentes desde la segunda guerra mundial hasta ahora.

En este artículo se pasa revista a la evolución de los puentes de fábrica, metálicos, colgados y atirantados en los últimos cuarenta años.

SUMMARY

The appearance of high-resistance steels and concrete, the possibility of using, when best it suits us, part of the actions which bridges require, new morphologies such as orthotropic slabs for metallic bridges or the stretching of planks and the development of new construction processes, have given rise to a tremendous speeding up in the evolution of bridgebuilding since the Second World War.

This article reviews the evolution of bridgebuilding (metallic, suspension and stretched bridges) over the last forty years.

INTRODUCCION

Creo que puede decirse sin temor a equivocarse que los puentes han progresado a lo largo de su historia y, en su progresión, se encuentran fases en las que el avance parece detenido mientras que en otras la aceleración ha sido rapidísima. En este

trabajo me voy a referir a una de las épocas en la que los puentes han experimentado un progreso notable: es la que comprende desde el final de la segunda guerra mundial hasta hoy. No es la época más brillante de los puentes —ésta queda sin discusión, para el siglo XIX—, pero, siendo importante, es la que más nos afecta por corresponder a los puentes que hacemos hoy.

Sin embargo, para dar congruencia a la exposición no podemos dejar de referirnos, aunque sea muy de pasada, a toda la historia anterior de los puentes, pues una época es consecuencia de la anterior y los puentes actuales no son sino el último eslabón de su historia.

Conviene clasificar los puentes para seguir mejor su evolución y para ello nada mejor que establecer las variables de que dependen en su sentido más radical.

La función de un puente, el hecho de que sirva para materializar una plataforma de paso con el fin de salvar un determinado obstáculo o la interferencia con otra vía, es una dimensión secundaria para determinar lo que es un puente o lo que está siendo. Es preferible comenzar diciendo que un puente está formado por un determinado material resistente —acero, hormigón, piedra o made-

* Conferencia dada el 10 de abril de 1984 en la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

ra— que, ordenado de una determinada manera —tipología estructural—, sirve para resistir el efecto de unas determinadas acciones. Nos encontramos así con los tres parámetros cuya evolución en el tiempo han determinado la evolución de los puentes: material resistente, tipología estructural y acciones.

Estos tres tipos de variables no son independientes, pues la tipología estructural va a depender del material utilizado y las acciones propias. Muchas de las acciones, su cuantía, va a depender de la respuesta resistente del material en una determinada morfología, etc., pero con determinadas salvedades podríamos establecer una clasificación desde cualquiera de ellas. Voy a elegir a la tipología estructural, como la más común, para hacer la clasificación de los puentes y seguir desde ella su evolución.

Desde la tipología estructural se pueden distinguir tres grandes familias de puentes:

1. Puentes rectos, que utilizan la viga como elemento resistente y que destacan la flexión generalizada como mecanismo principal del transporte de cargas.
2. Puente arco cuya invención fundamental consiste en disponer el material resistente de determinada manera —la forma arco— para que el traslado de las acciones, desde su localización a los apoyos, se realice produciendo esfuerzos predominantes de compresión.
3. Puentes colgados, forma inversa al puente arco que destaca a la tracción como fundamental mecanismo resistente.

Estas tres tipologías resistentes han permanecido desde los tiempos más antiguos y han estado vinculadas, si no exclusivamente, sí con gran frecuencia a tres materiales resistentes: la madera para el puente recto, la piedra para el arco y las

Representación de lo que se cree fue el puente romano sobre el Rin. Este esquema es tan claro y contundente que maravilla la perfección ingenieril a que llegaron los romanos. Es tan perfecto, tan adecuado que supone una clara lección para todos nosotros. En él se encuentran los tres elementos básicos de lo que hoy entendemos por un puente de vigas. La pila-pilote, la viga cabezal y el tablero de vigas.

Puente romano de Alcántara. Puente arco de fábrica de 30 m de luz.

Antigua pasarela colgada de cuerdas. Constituye un antecesor notable de las recientes pasarelas en banda tensada.

cuerdas para el colgado. De los tres tipos, del que más residuos históricos nos han quedado es el puente arco de piedra, y esto es lógico, pues es el material más durable y el puente que se realizaba en una determinada localidad cuando se quería hacer un puente para siempre.

Vamos a elegir este tipo de puente para destacar una de las facetas más importantes de la tipología estructural. El arco está dividido en dovelas de tamaño, forma y peso controlado. En esta subdivisión existe una dimensión nueva y es la constructiva. Utilizar elementos pequeños más fácil-

mente obtenibles y manejables, dispuestos según un determinado orden —la forma arco en este caso— para salvar luces grandes.

El puente será lo que va siendo mientras se construye. Es una especie de proceso de formación en el que la forma final es el resultado de un crecimiento. Tan importante es este hecho que incluso los puentes podrían clasificarse por su dimensión constructiva. Todos nos entendemos cuando hablamos de un puente construido en avance en voladizo, o de un puente de vigas prefabricadas, o de un puente empujado, etc. Esta dimensión del puente lo define dentro de las formas construidas y a los que los hacen se les ha llamado siempre constructores de puentes.

Pues bien, a lo largo de más de 1800 años se hace siempre el mismo puente. En su dimensión resistente el puente no cambia hasta mediado el siglo XVIII. La tecnología empleada en el puente de Alcántara es la misma que la del puente de Blois de Gabriel en 1716, salvo pequeñas variaciones. Arco de piedra dovelado, pilas gruesas, con relación de espesor a vano del arco de 1/5 para evitar su caída cuando se descimbre un arco y esté sin construir el contiguo. Un proceso artesanal más que lo que hoy entendemos por técnico. Unicamente a mediados del siglo XVIII, Perronet (1708-1794) introdujo cambios sustanciales en el arco de piedra. En el puente de Mantes (1757-1765) una pila se inclinó al descimbrarse un arco y Perronet fue llamado para rehacerlo, lo que le llevó a construir todos los arcos a la vez evitando así el empuje al vacío. Esto le permitió, en puentes sucesivos, reducir el ancho de las pilas a 1/10. Los arcos pasaron a ser de un solo centro con rebajamientos de hasta 1/12. Sin embargo, el puente de la Concordia (1786-1791) sigue perteneciendo, en su esencia, a los puentes antiguos.

En lo que acabamos de ver, y en lo sucesivo, estamos haciendo una lectura del puente a través de una de sus dimensiones constitutivas, la tecnológica, separándola de la totalidad del puente que, como hecho cultural, trasciende a cada uno de los aspectos en que pueda sintetizarse. Sería discutible si puede hacerse tal abstracción, pues está claro que incluso su dimensión tecnológica se nos ofrece en el puente junto con una serie de significados culturales que le dan sentido. Tenemos puentes románicos, góticos, renacentistas, barrocos, etc. en los cuales se puede ver el paso del tiempo y el cambio del mensaje tecnológico que nos transmiten.

EL SIGLO XIX

A finales del siglo XVIII se construye el puente de Coalbrookdale (1776-1779) sobre el Severn en Inglaterra, el primer puente de fundición que dio lugar a la época más brillante de la historia de los puentes y que se desarrolló a lo largo de todo el

siglo XIX. La revolución industrial cambió de una manera brusca la forma de producción, de un trabajo artesanal se pasó a un trabajo mecánico y organizado: la industrialización. Todo el espíritu inventivo, desarrollado a lo largo del siglo XVIII, cristalizó. La forma de pensar y de sentir de las gentes cambió. La realidad, su manera de entenderla, experimentó una transformación radical. Las cosas ya no interpelaban sobre su misma esencia sino qué hacer con ellas o cómo hacerlas.

Las necesidades de intercambio aumentaron de una manera espectacular y con ellas las vías de comunicación que debieron ser más rápidas y seguras. El ferrocarril se extendió por Europa y Norteamérica y con él los puentes. No sólo fue necesario realizar mayor número de puentes sino que además éstos debieron salvar luces cada vez más importantes.

Para ello fue preciso penetrar en el fenómeno resistente. Ya en 1678 Robert Hook estableció las leyes de la mecánica elástica. Con la fundación de la «Ecole de Ponts et Chaussées» se planteó de una manera sistemática el conocimiento científico del problema resistente. Los trabajos que Navier, Coulomb, Poisson, etc. desarrollaron a lo largo del siglo XIX vinieron a establecer la resistencia de materiales sobre bases seguras. Muller-Breslau y Castigliano siguieron los trabajos. Rankine publica su *Mecánica aplicada* en 1858 y Culman su *estática gráfica* en 1866.

Se forma el ingeniero, tal y como lo entendemos hoy en día. Se afrontan los problemas sin conocerlos del todo, extrayendo de la experiencia los conocimientos teóricos, elaborados posteriormente en el cuerpo de conocimientos científicos. El ingeniero de la época es una mezcla de científico y hombre práctico y su logro final es una tecnología cada vez más potente.

La época produjo una serie de ingenieros extraordinariamente brillantes. Telford, Brunel, Stephenson están enterrados en la Catedral de Wensminster junto con Nelson y demás héroes nacionales británicos. Es la época de Contamin, Eiffel, Seguin, Vicat, en Francia. De Eads, los Roebling, Lindenthal en EE.UU., etc.

EL PUENTE METALICO

El cambio fundamental del puente se realiza por el cambio de una de sus variables significativas, el material resistente. La fundición, en primer lugar, el hierro dulce y finalmente el acero introducen dos posibilidades extraordinariamente fructíferas. Aumenta espectacularmente la relación entre la capacidad resistente y el peso propio. En segundo lugar se consigue, por primera vez, y de una manera generalizada para la construcción, la posibilidad de obtener materiales moldeables. De

Puente de Coalbrookdale. Acabado en 1779 con proyecto y realización de Abraham Darby, Thomas Pritchard y John Wilkinson. El primer diseño de este puente fue un arco de mampostería apoyado en un anillo de fundición. Posteriormente se eliminó la mampostería y se reprodujo el tímpano con piezas de fundición. Casi siempre las primeras realizaciones, conceptualmente revolucionarias, reproducen las formas de las obras antiguas.

Puente Holt Fleet de T. Telford (1827). En este puente, Telford da un paso importante en el análisis de la fundición resistente de cada uno de los componentes del puente. Individualiza arco y tablero y los refiere entre sí por un medio discontinuo. Previamente ha realizado el puente de Cheptow, que es un paso intermedio entre este puente y Coalbrookdale.

Acueducto de Longdon. T. Telford es consciente, cuando proyecta este acueducto de fundición en 1795, de que su idea es completamente nueva. La pila inclinada se había utilizado mucho en estructuras y puentes de madera para reducir la luz del dintel. Aquí el dintel aparece limpio, apoyado sobre células triangulares de fundición.

tallar la piedra, elegir y cortar los árboles, a poder fabricar un material más resistente de cualquier forma, y en serie, median unas posibilidades para la construcción inusitadas.

Aunque la viga de alma llena aparece desde el principio en el acueducto de Longdon de Telford, el nuevo material propicia la elaboración de formas lineales, lo que conduce a plantear un reto tipológico nuevo. La celosía va a ser el resultado de esta investigación que va a permitir resolver la flexión de un gran dintel por articulación de una serie de elementos lineales, flexibles y cortos. Su importancia en la historia de la construcción va a ser a partir de entonces similar a la de la otra gran invención tipológica, el arco.

La historia de la celosía es asombrosa. Acostumbrados como estamos hoy en día a usarla y calcularla con suma facilidad no nos damos cuenta de lo que costó esclarecerla de una manera definitiva. Y lo cierto es que este problema se había planteado desde el comienzo de los tiempos, pues la madera plantea el mismo problema tipológico, pero sus logros no habían pasado de la utilización del puntal inclinado. Sin embargo Palladio en el siglo XVI ya conocía con bastante precisión las disposiciones más adecuadas para ordenar un trabajo a flexión general, realizando ejemplos de ce-

Ejemplos de celosías primitivas

Trabajos de Brunel en puente en celosía para puentes de madera. El puntal inclinado empieza a mezclarse con la triangulación.

Puentes de celosía realizados por Palladio en el siglo XVI.

Patente de puente en Celosía de Ballman.

Patente de puente en Celosía de Fink.

Viaducto de St. Mary de Brunel para puente de ferrocarril. En este puente se mezclan los hábitos de las antiguas construcciones de madera con cerchas modernas.

Puente de Ferrocarril de Saltash. En este puente, Brunel utiliza una serie de mecanismos resistentes combinados de difícil análisis. El arco superior y el cable colgado anulan sus reacciones horizontales para dar resultante vertical, en un esquema resistente muy utilizado en puentes de Inglaterra y Alemania en aquella época. Pero además Brunel establece una triangulación entre ellos. El puente de 138 m de luz fue construido sobre el río Tamar en 1853. Brunel utiliza en varios de sus puentes el tubo para el cordón de compresión.

losías de una asombrosa similitud a los actuales. Pero ocurrió que estos resultados no se incorporaron al repertorio general de la construcción y se olvidaron.

Las primeras celosías de Telford, de Brunel son torpes; no acababan de saber bien cómo funcionaba aquello. Y fueron los ingenieros americanos en los muchos puentes que tuvieron que realizar con la extensión del Ferrocarril hacia el Oeste los que fueron estableciendo los métodos adecuados. Fink, Whipple, Howe, Pratt, Warren extendieron sus procedimientos hacia mediados del siglo XIX. Finalmente fue Culmman, destacado por el gobierno suizo a Norteamérica para conocer el trabajo de los ingenieros americanos, el que resolvió de una manera definitiva el problema.

Celosía metálica de un puente recto de finales del siglo XIX. Que se pueda ver un puente así es el logro de la estructura en celosía. Muchos puentes de este tipo están siendo derribados o sustituidos por otros más modernos. Creo que se debería hacer un esfuerzo por conservar puentes tan hermosos.

Puente arco de Garabit, de G. Eiffel de 165 m de luz. La construcción de este puente se realizó en avance en voladizo como muchos otros puentes del Macizo Central en Francia. De igual manera se construyó el Firth of Forth. Desde entonces este procedimiento es el empleado para construir la mayoría de los puentes de gran luz. Apoyarse en lo ya hecho para avanzar.

La celosía y su unión por roblonado se extiende por el mundo a todas las tipologías. Los puentes rectos, los arcos y los puentes colgados la utilizan para dar rigidez a flexión a sus elementos estructurales.

A los puentes metálicos realizados en el siglo XIX les debemos además dos hechos importantes que sustentan el concepto de estructura resistente que ahora tenemos. El primero, de índole conceptual. La estructura pura, clara, sin adornos aparece desnuda en las instalaciones fabriles y los puentes. Hasta este momento la estructura resistente estaba fundida con otras estructuras funcionales, la de cerramiento, por ejemplo, u otras estructuras formales cargadas de connotaciones culturales. A partir de ahora la estructura resistente, expresada de una forma clara y distinta se convierte asimismo en un hecho cultural. El gótico, al que se le atribuye esa condición, no fue utilizado sino como referencia para afirmar algo radicalmente nuevo.

La otra aportación de los puentes del siglo XIX la encontramos en los procesos constructivos. Ya antes hemos dicho que el método de construcción está en la esencia de lo que es un puente. Ahora decimos que procedimientos tan actuales como es la construcción en avance en voladizo, el puente empujado, etc., son logros de aquella época.

E. Clark en 1850 y refiriéndose a la construcción de los puentes Britannia y Conway en el Noroeste del País de Gales dice «Vigas cajón de 470 pies de largo eran construidas en la playa a 1.000 pies de su localización permanente; eran transportadas por flotación sobre rápidas mareas... y pesando 2.000 t cada uno, eran elevados 100 pies hasta colocarlos en su sitio».

EL HORMIGÓN ARMADO

No sólo la estructura metálica es un logro del siglo XIX. En su cuarto final aparece otra aportación tan importante como la primera. El hormigón armado.

A John Smeaton se le atribuye la invención del hormigón en la construcción del famoso faro de Eddystone en 1774 y a Joseh Aspdin la regulación de los componentes del cemento portland en 1824. El hormigón armado se atribuye a varios progenitores. Un tal Dr. Fox elaboró en 1829 un sistema para construir pavimentos en cemento armado que en 1844 patenta. A J. Monnier se le atribuye la invención, para la construcción de jardineras en 1849. Lo cierto es que este sistema no se extiende hasta finales de siglo con los trabajos de François Hennebique y E. Coignet en Francia. También aparece su uso en 1875 en EE.UU. por Ward.

Este material heterogéneo introducía de nuevo la posibilidad de conseguir un material moldeable de

aspecto pétreo, la piedra artificial, que con la adición de armadura le proporcionaba la resistencia a tracción necesaria para resistir la flexión.

Decir esto en cuatro palabras es fácil, pero considerar lo que este descubrimiento supone para la construcción es más difícil. Constituye la aspiración que durante siglos ha esperado la humanidad. La viga de madera y el perfil metálico podían ser sustituidos por un material mucho más duradero e insensible a los efectos atmosféricos y que, además, tenía la propiedad de parecerse a la piedra, material que estaba perfectamente asumido culturalmente por la población. El acero en perfiles, sobre todo en su versión de viga triangulada, fue mucho peor recibida, era un cambio demasiado violento en la cultura común.

El desarrollo del hormigón armado fue rapidísimo, tanto en la edificación común como en los puentes. Se podía materializar el tablero de rodadura con un material pétreo, sin acudir a cambios de forma importantes. Todos los intentos de Perronet, a finales del siglo XVIII, de hacer arcos cada vez más rebajados tenían como finalidad reducir la forma de los puentes para evitar las sobreelevaciones de la calzada que le imponía la flecha de los arcos cuando se trataba de resolver luces significativas.

Sin embargo este nuevo material tiene como inconveniente principal la fisuración del hormigón y su deformación, cuando se trata de cubrir luces importantes a flexión. Por esta razón se empleó principalmente en luces reducidas cuando iba unido al tablero recto.

Puente de Palmones. C. Fernández Casado realiza, antes de nuestra guerra civil, una colección de puentes de altura estricta de hormigón armado, de la cual este puente es un ejemplo más. Son unos puentes de diseño muy cuidado en formas, proporciones y rendimiento resistente.

Todo el principio de siglo XX une al hormigón armado la tipología arco cuando se trata de resolver luces importantes. Es la época de los grandes constructores de arcos de hormigón. Ribera, Torroja y Fernández Casado son grandes constructores de puentes arco en España. Freyssinet, Esqui-

llan, en Francia, Maillart en Suiza son un ejemplo entre los muchos que se pueden poner.

Puentes arco de hormigón

Puente sobre el Rhin en Tavanosa. Rober Maillart (1872-1940) fue uno de los pioneros del hormigón armado y contribuyó con sus magníficas realizaciones a extender su uso en el mundo. Trabajó en todos los campos actuales. Desarrolló la losa sobre columnas, las estructuras laminares con su fantástica lámina para la sala del cemento en la exposición nacional, Suiza (1939). En el campo de los puentes realizó tanto puentes rectos como puentes arco y dentro de estos últimos, el arco antifunicular sin rigidez —configuración inversa al puente colgado— y el arco triarticulado como el representado.

Puente de Martín Gil sobre el Esla. Aunque el proyecto es del ingeniero Martín Gil se atribuye, con razón, a don Eduardo Torroja pues fue él quien lo construyó después de nuestra guerra civil. Para ello utilizó el método de la autocimbra de J.E. Ribera.

Puente de Sando. Para la realización de uno de los puentes de arco más bellos que se han construido, se empezó utilizando una cimbra de madera similar a la que Freyssinet utilizó en Plougastel. Esta cimbra se hundió durante la construcción y fue necesario recurrir a una cimbra tradicional apoyada en el suelo que siempre ha sido el principal inconveniente de la construcción de los puentes arco.

Puente de «La Roche-Guyon» (1935). N. Esquillan, nacido en 1902, es sin duda uno de los grandes constructores de puentes arco. Proyectó este puente de 161 m de luz en 1933, a los 31 años de edad, y constituyó el mayor puente del mundo en su momento de esta tipología. Es el autor también de puentes tan importantes como La Coudette, Conflans-lin-d'Oise, La Voukte, etc. En obras urbanas construyó el palacio de la C.N.I.T. (1958) de París de 218 m de luz y el estadio Olímpico de Grenoble (1968).

EL PUENTE DESDE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL HASTA HOY

Este es el panorama en que se encuentra la construcción de puentes al finalizar la segunda guerra mundial. El puente metálico en celosía ha seguido su camino triunfante a lo largo de las primeras décadas del siglo y el hormigón armado está presente, como uso habitual, en la construcción de puentes de fábrica. Los materiales tradicionales a lo largo de los siglos, la madera, la piedra, si no han desaparecido completamente de los puentes, su presencia es sólo simbólica.

El cambio que se produce en este momento no procede, como en la época anterior, de la utilización de materiales resistentes nuevos sino de la utilización del pretensado para los puentes de hormigón y de la losa ortótropa y la soldadura en los puentes metálicos, en una coyuntura especialmente favorable para los puentes, ya que era necesario rehacer todos los puentes destruidos durante la guerra. Otro hecho que se produce en esta época es la aparición de la autopista que va a cumplir, respecto a los puentes, el mismo papel que representó el ferrocarril en el siglo pasado.

EL PUENTE PRETENSADO

El pretensado del hormigón es una idea antigua, pues desde la aparición del hormigón armado se quiso poner las armaduras en carga. Un experimento realizado en 1886 por P.H. Jackson de S. Francisco y las primeras ideas de Freyssinet en Francia fracasaron por carecer de aceros de alta resistencia de los que no se dispuso hasta 1920. La puesta a punto del pretensado del hormigón la realizó Freyssinet entre 1928-33 y su primera utilización se realiza en la reparación de la estación marítima del Havre en 1933.

En su sentido más riguroso, el pretensado supone la posibilidad de utilizar la acción a nuestra conveniencia. Si no es una idea nueva en la construcción, sí es la primera vez que esta posibilidad se nos ofrece con toda rotundidad y con un grado de desarrollo poco frecuente. La acción y su efecto, que es uno de los tres parámetros alrededor de los cuales gira el puente, puede ser manipulada.

La repercusión que este hecho tiene en la construcción en general es inusitada. Los puentes, casi todos los puentes, se hacen a partir de entonces de hormigón pretensado.

La fisuración del hormigón armado y su deformación, que tenía a los puentes rectos reducidos a cubrir luces pequeñas, queda contrarrestada por la acción del pretensado, el cual a partir de cumplir su misión puede, si se quiere, convertirse en una armadura más del hormigón.

El pretensado abre otras puertas fundamentales para los puentes. Permite solidarizar partes construidas independientemente lo que, como ya hemos dicho, constituye un principio básico de la construcción: hacer lo grande con lo pequeño. De esta manera todos los procedimientos constructivos puestos a punto por la construcción metálica en el siglo pasado pueden ser incorporados por la construcción de hormigón.

La prefabricación, natural en la construcción metálica por su misma esencia, pasa al hormigón de una manera rotunda. La dovela, elemento básico en toda la historia de la construcción, no va a necesitar la forma del arco para comprimirse, ahora lo podrá hacer por el pretensado. Se podrá controlar el estado tensional de un puente empujado, levantado, girado, durante cada una de las fases de construcción.

Si bien el puente metálico, como veremos más adelante, seguirá su camino a lo largo de este siglo, puede decirse que el puente de hormigón pretensado dará el signo de estas décadas.

El primer puente pretensado se realizó en Alemania en 1938: el puente de Oelde, bajo proyecto y dirección de Freyssinet. Es un tramo biapoyado de 31 m de luz y formado por cuatro vigas doble T separadas entre sí 1,4 m y con la disposición de cuatro vigas riostras intermedias y dos en los extremos. Este puente fue pretensado en el más estricto sentido de la palabra, utilizando el molde metálico de las vigas como soporte de la puesta en carga de los alambres, lo que atrajo las críticas de Dischinger por el encarecimiento que este procedimiento introducía en los moldes. En este puente aparecen casi todas las disposiciones que posteriormente van a configurar los puentes de vigas. La viga toma forma de doble T con el fin de aumentar su radio de giro y obtener más eficacia del pretensado. La ordenación del tablero, una serie de vigas longitudinales yuxtapuestas, guiará toda la construcción posterior del puente de vigas prefabricadas. Las riostras transversales aparecen para mejorar el reparto transversal que sólo al cabo de bastantes años desaparecerán de los puentes.

Después de Freyssinet es necesario nombrar inmediatamente a U. Finsterwalder, uno de los ingenieros que más ha contribuido al desarrollo de los puentes pretensados. El puente de Balduinstein, sobre el Lahn (1950), de 62 m de luz es el primer puente construido en avance, en voladizo sucesivo, en hormigón pretensado. Finsterwalder recoge este procedimiento de Baumgart, que en 1930 construyó el primer puente en avance en voladizo de hormigón armado en el puente, sobre el río Peixe, y lo aplica al material para el que es idóneo, el pretensado. A este puente seguirán el puente del Mosela en Coblenza y los Nibelungos

sobre el Rhin en Worms. Su carro de avance, tal y como lo conocemos hoy en día, y el atirantamiento provisional son aportaciones suyas, que desembocan en lo que para mí es uno de los puentes más importantes que nunca se han construido, el puente de Bendorf, de 208 m de luz (1962). Desde aquí quiero rendir un homenaje a este fantástico ingeniero a quien no se ha ensalzado suficiente-

Puente de Balduinstein (1), primer puente construido en el mundo por el procedimiento de avance en voladizo sucesivo realizado *in situ*. U. Finsterwalder. Puente de Bendorf (2) U. Finsterwalder. Puente de Cuenca (3) (J. Manterola y L.F. Troyano), ejemplo de utilización del atirantamiento provisional en la construcción de un puente construido en avance en voladizo.

Como todos los grandes constructores de puentes de arco, Freyssinet no puede sustraerse a utilizar la ayuda de la forma, en este caso en modo pórtico, para resolver los puentes y en estos puentes del Marne la utiliza con una limpieza y precisión ejemplares. Estos puentes resultan asombrosos pues tienen, en apariencia, bastantes incongruencias. El pretensado reduce apreciablemente el efecto pórtico, tanto más cuanto la relación flecha-luz es más pequeña y aquí ésta se reduce al máximo por la pequeña altura de la célula triangular del borde, aunque se incrementa sutilmente con la curvatura vertical del dintel. La utilización de gatos planos en la base del pórtico le resultó esencial.

mente. Todos los que hacemos puentes en mi generación le debemos mucho a Finsterwalder.

El puente recto pretensado sigue con estas morfologías hasta hoy en día. El puente de vigas prefabricadas para las luces moderadas y el puente in situ, construido en avance en voladizo para las grandes luces. Su desarrollo en tiempos posteriores ha sido considerable pero no lo suficientemente significativo como para que en una historia de los puentes aparezca como algo nuevo.

Poco después aparece la utilización del puente in situ para el puente de luces moderadas y el puente prefabricado para las grandes luces.

El puente in situ de luces moderadas está mucho menos condicionado que el de vigas prefabricadas para acoplarse a los tableros curvos, bifurcados, etcétera que aparecen en los nudos de comunicación actuales. Sus posibilidades formales son infinitas, lo que ha determinado su casi exclusividad

de uso para determinados problemas. La industrialización de estos puentes ha llegado de mano de la de las cimbras, ya sean apoyadas en el suelo o autoportantes, circunstancia esta última sólo válida para el caso de puentes de gran longitud que permitan amortizar la gran inversión que supone su adquisición.

El puente prefabricado, construido por dovelas en avance en voladizo, fue iniciado en la Unión Soviética y utilizado por primera vez en Europa Occi-

Puente prefabricado del Huerna 1982 (J. Manterola y L.F. Troyano). La prefabricación se ha llevado aquí a todos los elementos constitutivos del puente: pilas, viga cabezal y tablero.

El puente hormigonado in situ tiene enormes posibilidades formales y la capacidad de acoplarse con naturalidad a los complejos planteamientos viales de los nudos de enlace modernos. Ramales de acceso a la estación de Chamartín en Madrid (1). Cruce de Ali (2) y paso superior en la autopista Campomanes León (3). (J. Manterola y L.F. Troyano).

La industrialización del puente recto in situ pasa por la utilización de grandes cimbras autoportantes. En el Puente de Buenos Aires, de 16 kilómetros de longitud, se llegó a fabricar un vano de 25 m cada 3 días. En un día se trasladaba la cimbra autoportante, se nivelaba, armaba y hormigonaba. Se dejaba endurecer el hormigón durante día y medio y a continuación se pretensaba. (L.F. Troyano y J. Manterola).

dental y de una manera simultánea por Carlos Fernández Casado en el puente de Almodóvar y por Campenond-Bernard en el puente de Choisy-le-Roi en 1962. Desde entonces la tipología ha experimentado un notable desarrollo producido principalmente por los franceses. Su ámbito de aplicación parece que está reducida actualmente a puentes de gran longitud y no demasiada luz, al-

Esquema de las piezas prefabricadas

Puente prefabricado de Oesterkelde, Holanda. La prefabricación de dovelas es llevada aquí a todos los elementos constitutivos del puente, cimentación, pilas y dintel. Los medios auxiliares utilizados son enormes, correspondientes a la gran longitud del puente.

rededor de los 120 m como máximo, si no se quieren encarecer sustancialmente los medios de montaje.

El puente empujado ocupa un lugar intermedio entre puente prefabricado y puente in situ y su desarrollo se ha extendido por todo el mundo, aunque su gestación inicial se realizó por Leonhard en el puente del Caroní en Venezuela.

Dovela prefabricada francesa. La deformación por cortante en el tiempo de las juntas de resina epoxi han conducido a realizar redientes en las almas verticales para que la transmisión del cortante se realice a través de ellas.

Montaje de puentes por medio de grandes vigas metálicas autolanzables.

Puente de Castejón sobre el Ebro (1968) (Carlos Fernández Casado, J. Manterola y L.F. Troyano).

Utilización de dovelas prefabricadas de tamaño pequeño con medios reducidos para un puente de $L = 101$ metros.

La estructura en celosía también ha encontrado su sitio en los puentes de hormigón pretensado. En el puente de Magfall de U. Fusterwalder se eliminó el alma llena sustituyéndola por una celosía. Este planteamiento no se ha vuelto a repetir en un puente similar debido a su gran coste pero resulta atractiva e interesante. En el otro puente se representa la utilización de la celosía en su esquema más simple para un puente de ferrocarril.

Acueducto empujado del Alcanadre (J. Manterola y L.F. Troyano). El dintel se va fabricando en una instalación fija al principio de la obra y se va empujando hacia adelante, ayudándose de la «nariz» metálica para acotar los esfuerzos que se producen durante la construcción a valores controlados.

La aparición del pretensado tuvo, entre otros efectos, la casi total desaparición del puente de arco de hormigón que, como hemos visto, era la forma que los puentes de hormigón armado utilizaban para salvar grandes luces. El arco plantea dos problemas a los puentes. Primero: la falta de adecuación del arco a las exigencias de rodadura del tráfico, lo que obliga a la disposición de un tablero superpuesto que cumpla este papel. El segundo es que la eficacia de la estructura arco se realiza cuando está cerrado, lo que ha obligado a la presencia de grandes cimbras para soportarlo durante la construcción. El pretensado del puente recto obviaba estos dos problemas y, por esta razón, se fue apoderando del campo de aplicación de este tipo estructural.

La aplicación del método de construcción de avance en voladizo a la estructura arco, unido al atirantamiento provisional, dio un respiro a esta tipología al eliminar la cimbra. Con este procedimiento se han alcanzado los 390 m de luz en el puente del Krk en Yugoslavia. Sin embargo, esta tipología vuelve a verse en peligro por la presencia del puente atirantado. Salvo para los casos en que el encaje de la obra en el terreno sea especialmente propicio, el puente atirantado resuelve mejor los problemas.

Puentes arco de hormigón

TAV. II

Puente de Parramata sobre la Bahía de Sídney. Este puente en 304 m de luz es un ejemplo perfecto de la utilización de la prefabricación en un puente de arco. Las dovelas, como la de los puentes romanos, se disponen sin armadura pasante alguna sobre una cimbra provisional.

Fases de la construcción de un puente arco en avance en voladizo. Para controlar los esfuerzos en el arco durante las fases de construcción, el arco se atiranta desde las pilas del viaducto de acceso.

Puente Rip. Luz 182,8 m. Este puente, no es un puente arco, aunque lo parece. El arco no es sino el cordón inferior de un dintel en celosía. No existe efecto arco pues la parte central del puente es una viga biapoyada con posibilidad de movimiento horizontal. En otros puentes, que sí son arcos, se ha seguido el mismo diseño, utilizando los tirantes inclinados para constituir una viga triangulada durante la construcción y eliminándola al cerrar el arco. Freyssinet utilizó este procedimiento, pero dejando los tirantes como definitivos en el puente del Veurdre (1910). En este caso, la estructura arco la mantenía al cortar el dintel encima del arranque del arco. De esta vinculación depende que el efecto arco sea o no predominante.

EL PUENTE METÁLICO

El puente metálico experimenta un desarrollo notable después de la Segunda Guerra Mundial con aplicación a la reconstrucción del gran número de puentes destruidos durante la contienda. Este desarrollo se produce principalmente en Alemania y estriba en los siguientes puntos:

1. Extensión de la utilización de la viga de alma llena, tanto en su versión de viga doble T o viga cajón. Esta tipología estructural ya había sido utilizada desde la aparición del hierro dulce a principios del siglo XIX. El puente de Britannia (1850) constituye un primer ejemplo de viga cajón de alma llena de grandes proporciones —140 m de luz— realizada por Stephenson. Posteriormente esta tipología se fue utilizando en muchos puentes sin competir para las grandes obras con la estructura en celosía. Pero el coste de fabricación más reducido de la estructura de alma llena y el menor número de uniones a realizar determinó su imposición.

Sección transversal del puente de Britannia. Este puente realizado por R. Stephenson en 1850 constituye, a mi entender, una de las aportaciones más importantes a la historia de la construcción de puentes. Es la primera viga cajón. Stephenson con ayuda de Fairbairn y Hodgkinson analizaron por medio de ensayos el tipo de material a utilizar —el hierro forjado—, la forma del cajón —si debía ser circular o elíptico— hasta que llegaron al convencimiento de que la sección rectangular era la mejor. Tenía dos vanos de 142 m de luz y otros dos de 70 m y se encontraba sobre el estrecho del Menai, a poca distancia del puente colgante de Telford. Este puente, desgraciadamente, no existe hoy en día pues un incendio lo destruyó parcialmente en mayo de 1970 y ha sido sustituido indecorosamente por dos arcos metálicos en solución que ya Stephenson rechazó en los diseños iniciales. Un ejemplo más modesto de estas mismas vigas, realizadas también por Stephenson, se encuentra en Conway, al lado de otro puente colgante de Telford.

Puente de Schierstein sobre el Rhin. $L = 250$ m.

2. La mejora de los métodos de unión. Los tornillos de alta resistencia están presentes en la construcción de los puentes desde 1940 y, sobre todo, la extensión del uso de la soldadura eléctrica y, posteriormente, de la soldadura automática. El desarrollo de la soldadura eléctrica se produce en los EE.UU. a lo largo de los años 1915 a 1922 y es en la construcción naval durante la segunda guerra mundial donde se resuelven los problemas que suscita. El bulón desaparece como método de unión.
3. El desarrollo e imposición de la losa ortótropa como tablero del puente metálico. La morfología de la sección transversal estaba ordenada como superposición de dos mecanismos de trabajo independientes. Una estructura secundaria que recibía las cargas exteriores de uso y la trasladaba a la principal longitudinal. La losa ortótropa viene a cumplir en una unidad los dos papeles. Recibe la carga exterior y actúa como cabeza superior del elemento de flexión longitudinal. De esta manera, la utilización del acero es mucho mejor. La soldadura automática ayuda especialmente a la imposición de esta morfología.

4. La mejora en la calidad de los aceros. De acero St 240/340 se pasa a aceros St 400/520 o St 550/700, que permiten reducir el peso del acero a utilizar en un puente recto. Los japoneses han llegado a aceros St 700/800 e incluso mayores.

La forma de la sección transversal más habitual es la viga cajón única (44%) y la formada por dos vigas doble T (27%), seguida a muy corta distancia de los dos cajones (25%). El tablero formado por más de dos vigas doble T es muy escaso (4%).

La esbeltez económica es algo mayor que en los puentes de hormigón pretensado $C/L \quad 1/25$ a $1/30$.

En cuanto a los procedimientos de rigidización de la losa ortótropa ha evolucionado bastante a lo largo de los años.

El más frecuente actualmente es el perfil trapecial o en forma de U (42,5%), seguido por los rigidizadores en L (34,8%). El perfil triangular con alargamiento por media doble T (18,9%) y la chapa vertical (11,5%).

El peso por metro cuadrado de tablero crece proporcionalmente a la luz según la expresión aproximada

$$p \text{ (kg/m}^2\text{)} = 1,4 \cdot L \text{ (m)} + 170 \quad L = \text{luz máxima}$$

y, salvo casos excepcionales, la dispersión del peso no sobrepasa (± 50 kg/m²).

El precio de estos puentes suele ser mayor que el puente de hormigón pretensado, lo que ha ocasionado un paulatino pero insistente desplazamiento de los puentes metálicos por los puentes de hormigón pretensado a luces cada vez mayores.

Cuando hoy en día se plantea un puente de 200 m de luz, las alternativas pueden ser hacerlo atirantado de hormigón o pretensado recto de hormigón, no metálico.

Dos formas de realizar tableros metálicos. La superior ha sido sustituida por la inferior, mucho más eficaz.

Puente sobre el Rhin en el sur de Bonn. $L = 230$ m.

Puente sobre el Mosela cerca de Coblenza. Altura de pilas 150 m y luz principal 218 m.

Puente del Zoo de Colonia sobre el Rhin. $L = 259$ m.

Puentes metálicos en dintel recto y sección cajón

La ligereza del peso propio, la calidad de los aceros unidos a la losa ortótropa con el proceso de construcción en avance en voladizo han llevado a la consecución de una magnífica serie de puentes metálicos rectos en la década de los 60, extendidos por Alemania y el resto de Europa occidental.

La subdivisión del tablero sigue pautas distintas al puente de hormigón.

La dovela, de dimensiones mucho mayores, del orden de 12 m, se obtiene por montaje independiente de las almas y una zona de las losas (inferior y superior por un lado) y el resto de losas, una vez fijadas las almas a la dovela anterior.

Puente sobre el Rhin-Deutz en Colonia.

New River George USA (1980). Es asombrosa la semejanza de este puente con el puente del Pino de Ribera, construido en 1913.

Un ejemplo evidente de este hecho lo ofrecen las sucesivas reconstrucciones del puente del Rhin —Deutz en Colonia—. La luz principal de este puente es de 184 m. En 1914-15 se construyó un puente metálico colgado. En los años 1947-48 se reconstruyó con un dintel metálico recto de inercia variable. En 1978-80 se ha realizado un ensanchamiento del mismo por adición de uno paralelo, de la misma forma que el metálico, pero realizado todo él en hormigón pretensado.

Este hecho ha propiciado la extensión de los puentes de estructura mixta, que sustituyen el tablero metálico —la parte más costosa del puente— por una losa de hormigón pretensado. Las luces que han alcanzado estos puentes son meno-

res que los completamente metálicos. Este tipo de estructura pretende recoger las ventajas de uno y otro material pero su extensión no es lo suficientemente grande como para que pueda decirse que existe un tipo de luces en que su presencia se impone a los otros dos materiales.

Formalmente los puentes rectos se están pareciendo entre sí hasta límites extremos, pues sólo se puede distinguir un puente metálico de otro de hormigón pretensado o mixto por el color.

El puente arco metálico ha seguido su camino en las dos morfologías conocidas del material, utilizando el alma llena o la celosía.

El mayor arco metálico construido, el New River George, en la Virginia Occidental, de 510 m de luz, ha sido terminado hace pocos años utilizando una estructura en celosía, tanto arco como tablero. Últimamente se están construyendo arcos metálicos con sección tubular, volviendo a lo que Brunel hacía hace más de 100 años.

El arco con tablero inferior también ha vuelto a aparecer en realización tan fantástica como el puente Keiserlei (1961-1964) sobre el Main de 220 metros de luz de H. Homburg. La tendencia en estos puentes es conferir la rigidez a flexión al tablero, dejando el arco como soporte antifunicular de la carga permanente.

La celosía en puentes rectos ha seguido su camino desde que, en el siglo XIX, fue el puente por antonomasia. Su frecuencia actual es pequeña pero puede verse aún en la tecnología de EE.UU. y del Japón.

Puente Matshushima, Japón. $L = 126$ m.

Puente de Keiserlei sobre el Main. $L = 220$ m.

Dos puentes en celosía modernos. Puente sobre el río Tonegawa (1972); y puente en Baltimore (1978).

EL PUENTE COLGADO

Si en las tipologías de puente recto y puente arco hemos establecido su exposición diferenciando claramente los períodos de antes y después de la segunda guerra mundial, en el puente colgado vamos a establecer un desarrollo lineal en el tiempo, desde sus primeras realizaciones hasta la actualidad. Y esto lo hacemos porque existe una especial continuidad en esta tipología. No quiero decir con esto que el puente colgado no participe, como las demás tipologías, de los problemas de su tiempo, sino que aquello que le es propio al puente colgado se aclara mejor tratando su problema de una manera continuada.

En la historia del puente colgado se destacan con suma facilidad tres períodos diferentes:

- 1.º Desde principios del siglo XIX hasta la construcción del puente del Niágara, de 250 m de luz por Roebling en 1854.
- 2.º Desde el puente de Brookling de Roebling en 1883 hasta la caída del puente de Tacoma en 1940.
- 3.º Desde este momento hasta la actualidad.

Si el puente colgante está presente en la historia del puente desde las primeras épocas de la Huma-

nidad, el primer puente colgante moderno lo construye James Finley en 1801 en Pennsylvania. Se trata de un puente de 70 m de luz en el que se pueden distinguir los elementos que caracterizan lo que hoy podemos entender por puente colgante. Su estructura portante estaba formada por una cadena de hierro parabólico, de la que colgaban las péndolas que sostienen a un tablero rigidizado de perfil horizontal.

Telford comienza en 1810 los diseños del puente sobre el estrecho de Menai de 177 m de luz, utilizando cadenas como elemento sustentante, puente que acaba de construirse en 1826. Esta tipología se extiende con gran rapidez por la enorme facilidad que presenta para resolver luces importantes de una manera muy económica. En Francia, Marc Seguin construye en 1825 el primer puente colgado de cables y Vicat desarrolla un ingenioso método de tesado de los cables in situ en el puente sobre el Ródano en 1829 y forma una sociedad para construir puentes de esta tipología que se extiende rápidamente por Francia y Alemania.

Los conocimientos teóricos que soportaban estos puentes eran muy escasos. En general eran puentes extremadamente flexibles. La viga de rigidez era de dimensiones mínimas y se enfrentaban mal a las cargas descentradas y a los esfuerzos producidos por el viento. Como consecuencia de esta enorme flexibilidad, las caídas de estos puentes eran muy frecuentes.

El puente de Menai estuvo a punto de caerse varias veces y fue extraordinariamente dañado en 1839 con la caída del tablero de madera que fue reconstruido por Rendel, lo que llevó a Telford a asegurar que no podía construirse un puente colgante de más de 600 pies. Esto le condujo a interminables discusiones con Brunel cuando éste propuso su solución de 702 pies para su puente de Clifton en 1830.

Primeros puentes colgantes modernos. T. Telford. El puente del Conway (derecha), debido a su particular situación y su pequeña luz se mantiene en la misma configuración con que lo dejó terminado Telford. La viga de rigidez no es sino la barandilla del puente. En cambio en el puente del estrecho de Menai (izquierda), muy expuesto a la acción de las galernas, no ha podido resistir y se encuentra hoy en día rigidizado por una celosía triangular moderna.

Puente del Niágara (1848). J. Roebling ($L = 250$ m). Primer puente colgante de ferrocarril. Fue reemplazado por un puente arco en 1897.

El problema hiperestático de interacción entre cable y viga de rigidez no había sido resuelto aunque P. Barlow mostró, por medio de modelos reducidos, la interacción de los dos sistemas y Rankine esbozó una primera teoría del comportamiento conjunto, que forzó a Brunel a rigidizar más su tablero.

Puente de Brooklyn, J. y W. Roebling ($L = 484$ m). Es el primer puente colgado de acero del mundo y acerca de él J. Roebling escribió: «... cuando esté construido de acuerdo con mi diseño, no sólo será el más grande puente que exista sino también será la más grande obra de ingeniería del continente y de la edad...». Realmente lo fue.

Sin embargo no existía una toma de postura clara respecto a la necesidad de rigidizar el tablero, lo que ocasionó la caída frecuente de estos puentes por acción del viento.

El principio del segundo período de los puentes colgados lo constituye la propuesta y feliz realización por J. Roebling del puente de ferrocarril del Niágara en 1848.

La realización de este puente es una muestra evidente del coraje que tuvo que poner Roebling para construir un puente de ferrocarril contra la opinión

de los más ilustres ingenieros de la época. Stephenson había rechazado esta tipología para su puente de Britannia y emitió un informe muy duro sobre el puente de Niágara. Sin embargo, Roebling —alemán de origen— conocía perfectamente la sensibilidad de estos puentes a las cargas y al viento. En una carta de 1846 que Roebling escribe a Ellet le dice «... Cuanto mayor sea el vano más rígido deberá ser construido, de acuerdo con su gran peso, que es necesario asegurar establemente. Para obtener el mayor grado de rigidez, toda la madera empleada se deberá disponer, tanto como sea posible en dirección de los tableros: las celosías son útiles, pero no es preciso aplicarlas en gran escala. Para contrarrestar la posibilidad de plegado del cable, se deben aplicar cables contra vientos, con lo que un cierto número de puntos que deben coincidir con los modos de vibración, se convierten en puntos fijos y de esta forma los cables principales y los contra vientos actúan coordinadamente para soportar el tablero».

En el puente de Brooklyn, Roebling aplica los resultados obtenidos en el Niágara y en el puente sobre el Ohio (320 m) en Cincinnati (1867), cubriendo una luz de 486 m que subsiste hasta ahora.

Sin embargo, los puentes sucesivos —la gran época americana— son una continuada e insistente reducción de la rigidez del puente. Es evidente que el sistema de rigidización planteado por Roebling era altamente hiperestático e inaccesible a los medios de cálculo de la época. Junto con el cable portante principal, Roebling introduce una segunda familia de cables rectos sujetando lateralmente las vigas de rigidez del tablero, que se ha demostrado —incrementa la rigidez de estos puentes a las cargas no simétricas y al viento— pero que entonces parecían excesivas.

De esta manera los puentes que siguen a Brooklyn empiezan por eliminar la familia de tirantes, tal es el caso del puente de Williamsburg (1903) de sólo 1,37 m más de luz que el puente de Brooklyn, pero sigue manteniendo vigas de rigidez de extraordinario canto (1/40) y a continuación conforme van depurándose los métodos de cálculo se va afinando el tablero.

En la década de los años treinta de este siglo se producen tres puentes fundamentales. O.H. Ammann sobrepasa en 1931 los 1.000 m de luz en el puente de George Washington (1.066 m) en Nueva York. J.B. Strauss hace en 1937 el Golden Gate de 1.280 m en S. Francisco y L.S. Moisseiff el puente de Oakland también en San Francisco.

En el puente de Tacoma de Moisseiff (853 m) se extrema la flexibilidad del puente. El cálculo teórico de los puentes colgados había avanzado mucho en lo que se refiere a las cargas estáticas tanto verticales como de viento y se dispone una viga de rigidez de alma llena de 2,4 m de canto, con lo que la esbeltez que era de 1/40 en el puente de Brooklyn ha pasado a 1/350 en éste. Además la viga de rigidez no es permeable al viento como lo es la viga de celosía, lo que incrementa la inestabilidad en un puente muy estrecho. Todos los parámetros del puente se van sumando para realizar un puente extraordinariamente inestable que el viento tira en 1940 después de estar pocos meses en servicio y con unas velocidades de viento muy moderadas del orden de 60 km/h. Las oscilaciones torsionales llegaron a ser de $\pm 45^\circ$.

La rotura del puente de Tacoma fue una más de entre las muchas que produjo el viento en estructuras tan flexibles, pero fue la primera que produjo la toma de conciencia de la profesión sobre los fenómenos aeroelásticos y que ha dado lugar a la tercera etapa de los puentes colgantes con importante influencia en su morfología. Este es otro de los casos, como el pretensado, en el que el cambio en los puentes se realiza por la acción, en este caso acción-respuesta. La aeroelasticidad trae dos consecuencias: La primera es empezar a rigidizar casi todos los puentes colgados construidos hasta el momento, en la dirección de conferirles rigidez a torsión, ya que la inestabilidad se produce cuando las frecuencias de flexión y torsión están muy próximas y, en casi todos estos puentes, la rigidez está conferida por dos vigas en celosía situadas bajo los cables portantes y, en este caso, las frecuencias de ambos modos son muy parecidas.

Al puente George Washinton se le dispone el segundo tablero y, por tanto, la viga de rigidez. Realmente este puente que estuvo durante años sin viga de rigidez, tuvo la suerte de ser muy ancho y tener un tablero de hormigón lo que le proporciona masa repartida a lo ancho del tablero y, por tanto, separa los modos de vibración. Al

Golden Gate se le añade una triangulación horizontal inferior que cierra la viga cajón proporcionándole rigidez a torsión que va a impedir las grandes oscilaciones de hasta 3,3 metros que se produjeron en diciembre del año 1951. Al puente Bronx-Whitestone de Ammann se le añade una triangulación encima de las vigas de alma llena que tenía.

La aeroelasticidad demuestra que la inestabilidad principal de estos puentes es a torsión y para evitar el flameo deben separarse ambos modos de frecuencia a flexión y a torsión. Demuestra que la viga triangulada es mejor que la de alma llena y que el tablero horizontal debe hacerse lo más caído posible.

Puente de George Washington (Ammann, 1931) $L = 1.060$ m. Este puente, previsto para dos tableros superpuestos, no pudo ser construido más que con el superior a causa de los problemas económicos producidos durante la depresión. El segundo tablero junto con la viga de rigidez se construyó en 1950.

Puente del Golden Gate (Strauss 1934) $L = 1.280$ m.

Puente Tacoma. Fotografía tomada instantes antes de la rotura.

Puente de Verrazano (en construcción) 1962, O.H. Ammann.

Sección transversal del puente de Severn. Brown.

Puente de Humber, Brown. Actual récord mundial absoluto de luz con 1.430 m.

A partir de entonces se plantean dos escuelas o dos maneras de hacer puentes colgantes. Lo que puede denominarse la escuela americana, que sigue utilizando vigas en celosía para la viga de rigidez, gran rigidez a torsión y calado del tablero. En esta dirección se construyó por Ammann el puente de Verrazano de 1.296 m de luz en el año 1960, el puente de Lisboa y lo que será el nuevo récord mundial de luz, el proyecto aún no construido del puente sobre el estrecho de Akashi en el Japón de 1.780 m de luz.

Sección transversal del puente de Verrazano

Sección transversal del puente del Severn

Anteproyecto del puente de Mesinssa. L = 3.000 m.

Evolución de la sección transversal de los tableros de los puentes colgados. En el puente de Verrazano se mantiene la celosía metálica clásica de la escuela americana. La rigidez a flexión y a torsión se consigue por la formación de una viga cajón cerrando la celosía en sus cuatro caras. En el puente del Severn se mantiene una gran rigidez a la torsión, introduciendo un perfil casi aerodinámico que reduce la presión estática del viento y la excitación de los remolinos de V. Karman. En el anteproyecto al puente sobre el estrecho de Mesina se elimina la rigidez a flexión y torsión del tablero. Este diseño ha sido mejorado posteriormente para otros proyectos futuros separando las dos calzadas.

La segunda escuela la establecen los ingleses con el puente del Severn en 1966. En este puente, seguido por el puente del Bósforo (1973) y, finalmente, por el actual récord mundial de luz, el Humber de 1.410 m, Brown aborda el problema de otra manera. Extiende la masa del tablero a todo lo ancho, separa claramente las frecuencias a flexión y torsión del tablero e introduce un perfil casi aerodinámico que reduce la producción de los remolinos de Vom Karmann.

Existen en la actualidad bastantes discusiones sobre ambas morfologías de la sección transversal. Los americanos dicen que la forma aerodinámica impide la disposición de un segundo tablero e incrementa fuertemente la acción del viento sobre los usuarios del puente al ser éste desviado por la forma del dintel. Por el contrario, los ingleses aducen que la forma americana tiende a ser inestable y que sólo la gran rigidez a torsión de estos puentes controla la inestabilidad para las presiones de viento de cálculo.

De los últimos estudios parece que se va llegando a una solución diferente y que participa de ambas teorías. Estos estudios, realizados principalmente para el puente sobre el estrecho de Mesina de 3.300 m de luz, plantean un hecho totalmente

nuevo. Eliminar la rigidez a torsión y a flexión del tablero, que para estas luces no contribuye a rigidizar el puente y hacer que el viento se autoamortigüe por el paso en dirección vertical a través del tablero. La sección transversal se hace muy calada, separando incluso las vías de circulación y proporcionando al poco espesor necesario del tablero la forma más aerodinámica posible. El tablero no tendrá otra misión que puntear transversalmente la carga entre los tirantes.

EL PUENTE ATIRANTADO

Probablemente el puente atirantado se remonta a los tiempos más antiguos de la Humanidad pues la intuición resistente que lo produce es inmediata. Sostener una viga por una serie de cuerdas rectas, en situación inversa del puntal.

Como vestigios más modernos, aparece en un grabado el puente atirantado de Frobenius en el siglo XVII en disposición morfológica similar al Albert Bridge de Londres de 1874. Por otro lado, el puente atirantado aparece en el siglo XIX en primeras realizaciones con fracasos sucesivos. Realmente es una estructura más complicada que la colgada para obtener un dimensionamiento inmediato. Los tirantes no se ponían en carga para el peso propio, lo que determinaba unas deformaciones excesivas del dintel hasta que el tirante redujese la flexibilidad que le proporciona su gran catenaria inicial.

Un informe de Navier a mediados del siglo pasado ocasiona su casi total desaparición de las morfologías habituales, a partir de la caída del puente de Saale en Alemania.

Sin embargo su presencia ronda al puente sirviendo de ayuda al puente colgado como ya hemos visto en los puentes de Roebling. Arnodin plantea y construye a principios del siglo XX una serie de puentes en el que los dos tercios laterales del vano principal y los accesos están sostenidos por tirantes y el tercio central por un cable curvo. Dischinger plantea el mismo esquema estructural para el puente del Elba de 780 m de luz en 1938, pero no se construye.

En atirantamiento estricto Arnodin construye en 1903 el puente transportador de Nantes y en colaboración con S. Palacios el de Bilbao.

Pero hay que esperar hasta 1955, año en el que Dischinger proyecta y construye el puente de Stromsund de 182,5 m de luz, para que el puente atirantado experimente su lanzamiento definitivo, si olvidamos el adelanto establecido en 1929 por don Eduardo Torroja en el acueducto de Tempul de 56 m de luz. En este acueducto Torroja, según explica él, recurre al atirantamiento para resolver un problema particular. No parece que estuviese

en su mente reactivar al puente atirantado como sistema de salvar grandes luces.

Dischinger construye su puente de Stromsund con tablero metálico y es en este material donde experimenta sus primeros desarrollos. Va a compartir con el cajón metálico continuo la reconstrucción de todos los puentes sobre el Rhin y a servir de tipología para la fabricación de otros nuevos, exigidos por las necesidades viales de la segunda mitad del siglo XX.

La morfología del puente atirantado metálico ha ido depurándose a lo largo de sus 29 años de existencia en varias direcciones:

1. La altura de la torre con respecto a la luz del vano principal oscila alrededor de 1/20, cifra en que se optimiza el precio conjunto de pila más tirante.
2. Los tirantes se disponen en una de las siguientes tres disposiciones:
 - 2.1. En abanico: es la disposición que proporciona la distribución de rigidez del atirantamiento más uniforme en el dintel. Tiene como inconveniente la acumulación de cables y anclajes en la cabeza de la torre.
 - 2.2. En arpa: esta disposición es menos eficaz que la anterior pues los tirantes del vano principal no están referidos a los tirantes anclados en punto fijo en el estribo sino a través de la rigidez de la pila. Sin embargo, es la disposición más habitual de los puentes del Rhin ya que los tirantes del vano de compensación se anclan a pilas dispuestas bajo el mismo vano y entonces la eficacia del sistema de atirantamiento vuelve a ser grande.

Puente Teodoro Heuse sobre el Rhin en el norte de Dusseldorf. L = 260 m (1959). Aunque es el segundo puente atirantado construido, presenta una rara perfección. Las torres están unidas al dintel formando parte de la superestructura con los tirantes. Es como una gran viga de inercia variable apoyada sobre las grandes pilas de fábrica. La sección transversal del dintel está poco evolucionada. Se compone de dos grandes vigas cajón unidas por una losa ortótropa.

Puente de Bonn norte, sobre el Rhin. $L = 280$ m (1967). En este puente aparece por primera vez, junto con el puente de Rees, el atirantamiento múltiple que simplifica la construcción, abarata los tirantes y reduce las flexiones en el dintel. Bajo el dintel, la pila se extiende lateralmente para recoger la torsión debida a la carga descentrada. Este apoyo rígido hace ineficaces a los tirantes en su proximidad, lo que determina la forma característica en que se distribuye el atirantamiento. Esta disposición se verá en todos los puentes de pila central empotrada en el dintel y que se apoyan sobre una pila ancha. El pandeo lateral de la pila es el único problema nuevo que se presenta.

Puente Severin, sobre el Rhin, en Colonia. $L = 301$ m (1959). Aparece la pila en forma de «A», claramente separada del dintel aunque éste aún se apoya en ella. No era el puente más barato que se podía haber construido en el sitio y, gracias a eso, contamos con un muy hermoso puente.

Puente Neuwied sobre el Rhin

Para los puentes de dos vanos de luz parecida resulta interesante disponer una pila central con gran rigidez a flexión en sentido longitudinal, lo que aquí se establece disponiendo los pilares de la pila central en «A» en dirección del eje del puente. La rigidización del atirantamiento, fundamental para la eficacia de su misión, se consigue mal en los tirantes de compensación que están unidos a los apoyos fijos por ser muy largos e inclinados. La pila cumple esta misión.

- 2.3. Mixta: intenta evitar los problemas de la disposición en abanico y los de la disposición en arpa, extendiendo los tirantes en una zona de la parte superior de la pila.

De cualquier manera la disposición de los tirantes es objeto de un estudio de optimización que depende principalmente de la relación entre luces principal y de compensación; del tipo de vinculación del dintel con el contorno y de la presencia o no de apoyos fijos en pila principal. Todo apoyo fijo supone siempre la expulsión de sus inmediaciones de los tirantes y el símil más claro de comportamiento es el de la viga sobre fundación elástica.

3. El número de tirantes ha ido creciendo a lo largo del tiempo por varias razones:

- 3.1. Minimiza los problemas que se producen durante el proceso constructivo.
- 3.2. Reduce las flexiones de servicio en el dintel.
- 3.3. Disminuye el número de torones por tirante que ayuda a normalizar las cabezas de anclaje.

En el puente de Stromsund la separación de tirantes es de 35 m y en Kohlbrand se ha reducido a 16 m.

4. La sección transversal del dintel va decantándose en dos direcciones:

- Si el sistema de atirantamiento cuelga al puente de su eje, la sección transversal se convierte en un cajón único de una o dos células con voladizos transversales que recoge en sí mismo las torsiones debidas a las cargas descendidas y al viento.
- Si el sistema de atirantamiento cuelga el puente de los bordes, la sección transversal se convierte en dos vigas laterales arriostradas entre sí. El sistema de atirantamiento es el encargado de recoger las torsiones generales del tablero.

5. La forma de la pila depende de la elección del tipo de atirantamiento. Si el atirantamiento va dirigido al eje del puente, la pila puede ser un vástago unido al dintel y colocado en el centro, de pequeña dimensión transversal para evitar el ensanchamiento no útil del tablero, o la que va siendo cada vez más frecuente, el doble triángulo que contornea el dintel en esquema similar al que por primera vez se realizó en el puente de Kohlbrand, aunque en este puente el atirantamiento termina en los bordes. La pila en «A» tan magníficamente representada en el puente de Severin se ha extendido poco por la enorme anchura que adquiere en la cimentación cuando la distancia entre ésta y el tablero es grande.

Si el atirantamiento se realiza en los bordes la disposición de la pila se convierte en dos fustes colocados a los lados del dintel, arriostrados entre sí.

Puente de Kohlbrand. Hamburgo. $L = 325$ m (1974)

La eliminación del apoyo del dintel en la pila supone la desaparición de «puntos duros» en el sistema de atirantamiento y, por tanto, no aparecen concentraciones de flexiones en dicho punto. Para conseguirlo en el puente de Kohlbrand aparece por primera vez la pila en doble triángulo —trapezio, triángulo—, que contornea al dintel sin sujetarlo más que lateralmente. Esta pila es la versión de la pila en «A» cuando el dintel está muy separado de la cimentación.

Puente de Rande. España $L = 401$ m (F. del Pozo y M. de Miranda). Un excelente ejemplo de un puente con tablero metálico y atirantamiento lateral.

Puente de Flehe, sobre el Rhin, en Düsseldorf 375 m (1982). Sigue la pauta de los puentes de Düsseldorf, cables en arpa y atirantamiento de compensación anclados a pilares rígidos. El tablero del vano principal es metálico, el de compensación de hormigón.

Puente de Vratislava, sobre el Danubio. Checoslovaquia, $L = 303$ m (1972).

Este es uno de los pocos ejemplos realizados con pila inclinada. Los otros dos son el puente de Batman en Birmania y el puente del Ebro en Navarra. La pila inclinada hacia atrás mejora la rigidez de los tirantes de compensación por ser más cortos, pero crea problemas en el equilibrio de las fuerzas horizontales del dintel, cuando como en este caso, no existe transmisión de estas cargas entre pila y dintel. Aquí se ha resuelto estableciendo una coacción exterior horizontal al dintel en las proximidades de la pila.

Puente de Overkasseler, sobre el Rhin, en Dusseldorf. $L = 257$ m.

Este puente es un ejemplo de una serie de puentes alemanes en los que se utiliza un atirantamiento en arpa. Todos los tirantes del vano de compensación —simétrico del principal— van anclados al suelo a través de pilares fijos. Debido a su simetría, este puente pudo ser construido a 50 m de su localización definitiva, dar paso por él mientras se destruía el puente al que sustituye y repararlo transversalmente a su posición definitiva una vez terminada esta operación.

Puente Neckartal Weitingen

En este puente se utilizan los tirantes bajo el dintel con el fin de eliminar el soporte en una ladera con mala cimentación. Aquí el concepto resistente es el mismo que utilizó Torroja en el acueducto de Tempul.

Puente de Maracaibo. R. Morandi $L = 230$ m (1962)

Morandi realizó el primer puente de hormigón atirantado a los pocos años de la aparición del primer puente metálico y, además, en puente continuo. La continuidad en los puentes colgantes o atirantados se resuelve fácilmente con la disposición de pilas rígidas a la flexión longitudinal, que casi eliminan la influencia de un vano en otro. Existen otros procedimientos como el atirantamiento superior de las cabezas de las torres aunque son menos eficaces. Morandi ha sido fiel a este esquema estructural, incluso cuando el puente no tenía varios vanos. Otro de los puntos a que Morandi es fiel es al hormigonado de los tirantes para protegerlos.

Las pilas, su unión al dintel y la distribución del atirantamiento a lo largo de los vanos es un problema de decisión única ya que están íntimamente relacionados a través de las vinculaciones que se establecen entre ellas y sus rigideces respectivas.

El puente atirantado con tablero de hormigón aparece muy pronto, en 1962, con el fantástico puente de Maracaibo de R. Morandi. La luz de este puente es de 240 m. El esquema de Maracaibo lo ha repetido Morandi en muchos de sus puentes, pero lo que estuvo bien para el año 62 ha dejado de estarlo en los sucesivos.

El puente de hormigón es mucho más sensible que el metálico al número de cables de atirantamiento. Si en éste la distancia normal entre tirantes oscila entre 15 y 20 m, en los puentes de hormigón debe oscilar entre los 6 y 12 m. La razón para ello estriba en el mucho mayor peso del dintel y en los esfuerzos que se producen durante el proceso constructivo.

El puente de hormigón ha evolucionado en sus 20 años de vida en dos direcciones. En la primera, la ya anunciada, el número de tirantes no ha dejado de aumentar. De dos tirantes por vano principal en el puente de Maracaibo se pasó a cuatro tirantes en el puente sobre el río Waal, de 267 m de luz. En Chaco Corrientes de 245 m se adopta la disposición de pila del puente de Maracaibo pero con cuatro tirantes en el vano principal.

El puente del Dnepr, de 144 m de luz, adopta seis tirantes en el vano principal. Hoesch y Ebro adoptan ya la disposición de un enorme número de tirantes que se estabiliza en realizaciones como Pasco-Kennewick y Brotonne. Finalmente en Barrios, de 440 m de luz, los tirantes se disponen a 8,08 m.

El aumento de número de tirantes ha incidido también en la esbeltez y peso del dintel. Mientras que en los puentes de Morandi la esbeltez no pasa de 1/50, en el puente de Waal pasa a 1/70; en el Ebro a 1/146 y finalmente, en Barrios de Luna, a 1/183.

Esta progresión en la esbeltez del puente se reduce cuando se utiliza atirantamiento al centro del dintel, pues entonces se necesita que éste proporcione la rigidez a torsión que no producen el sistema de atirantamiento y el dintel debe adquirir área y por tanto canto.

La segunda faceta en la que se ha visto la evolución del puente atirantado ha sido en la sección transversal. Esta evolución se ha dirigido hacia una clarificación de su forma de trabajo, adquiriendo morfologías similares a la de los puentes metálicos.

De secciones transversales muy parecidas a los dinteles rectos de sección cajón, distribuidos a lo largo del ancho, se ha desembocado en el cajón único mono-celular o bicelular, para el caso de atirantamiento en el eje y disposición de dos vigas laterales con diafragmas transversales para los dinteles atirantados al borde. Esta tendencia última no es tan clara en puentes de hormigón como en metálicos pues los problemas que se producen durante la construcción son mucho más serios y muchas veces es necesario disponer almas intermedias para proporcionar área al dintel y colocar adecuadamente los medios de construcción.

Si los dinteles en tableros de hormigón se parecen a los de los puentes metálicos, en lo que se refiere a las torres puede decirse lo mismo.

La construcción mixta del tablero, construida por vigas metálicas con tablero de hormigón, aparece como muy interesante pues presenta las ventajas de la construcción de los puentes metálicos y la economía del tablero de hormigón, manteniendo un peso controlado.

En cuanto a las posibilidades futuras de esta tipología son enormes. De hecho es una configuración más rígida que la del puente colgante con cable curvo; el gasto en acero de cuelgue es bastante más pequeño y los problemas constructivos que produce están totalmente resueltos.

Si el mayor puente del mundo en esta tipología es el puente de Barrios de Luna de 440 m, las espectativas de luz adquiribles con esta morfología son mucho mayores. Se han realizado anteproyectos con 780 m —Puente del pequeño Belt— y 1.300 m para el estrecho de Messina. Incluso hay estudios que demuestran podría ser adecuado incluso para luces mucho mayores.

Puente de Waal. L = 267 m.

En este puente el número de tirantes es cuatro en el vano principal. La sección transversal está muy mal concebida, dispone dos vigas cajón a la manera de un puente de hormigón pretensado normal sin tener en cuenta que el atirantamiento se realiza en los bordes. Resulta curioso constatar, una vez más, lo difícil que resulta alcanzar disposiciones que ahora nos parecen evidentes y que no lo fueron en su día. Las formas logradas, acabadas, clásicas son el resultado de muchos pasos incompletos dados con anterioridad.

Puente del Ebro, Navarra. $L = 148$ m (L.F. Troyano y J. Manterola).

Es el único puente de hormigón con pila inclinada y sin vano de compensación. La solución del equilibrio de fuerzas horizontales se realiza por dos tornapuntas bajo tierra. Tiene un atirantamiento espacial muy interesante desde el punto de vista resistente y formal.

Puente Carlos Fernández Casado, sobre el embalse de Barrios de Luna. $L = 440$ m (1983) (J. Manterola y L.F. Troyano).

Este puente ostenta el récord mundial de luz de puentes atirantados, tanto en su versión tablero metálico como tablero de hormigón.

Puente de Brotonne. $L = 320$ m.

Es un ejemplo muy similar al puente metálico del norte de Bonn. La sección transversal está ingeniosamente resuelta con atirantamientos internos de hormigón pretensado que refieren la acción de los tirantes exteriores que van al centro del cajón, a los vértices inferiores de la viga cajón.

Puente Ganter en el Simplon (Suiza). (Chr. Menn)

Todo el sistema de atirantamiento se recoge en este puente en unos diafragmas de hormigón. Su forma, construcción y respuesta resistente producen asombro y dudas.

BANDA TENSADA

La última novedad en el planteamiento de los puentes en las últimas décadas lo constituye la banda tensada. La banda tensada consiste en reunir en un solo elemento estructural la viga de rigidez y el cable portante de un puente colgado.

Fue planteada por primera vez por el ingeniero uruguayo Viera que realizó, por este procedimiento, el puente sobre el arroyo Maldonado con tres vanos y luz principal de 90 m.

La banda tensada utiliza dos condiciones básicas: una relación flecha/luz extremadamente pequeña (oscila entre 1/50 y 1/100) y unos espesores de hormigón también muy pequeños, que rara vez sobrepasan los 30 cm. El primer hecho es fundamental por dos razones:

- Establecer la rasante de la plataforma lo más plana posible para permitir un tráfico rodado adecuado.
- Introducir una gran rigidez al puente ante las solicitaciones de uso. Cuanto más tensa es la banda, menores flechas experimenta para sobrecargas descentradas.

Relaciones flecha/luz tan extremadamente pequeñas conducen a la necesidad de disponer gran cantidad de cables internos. El pequeño espesor

de la losa de hormigón tiene como misión reducir el peso al mínimo y no competir con la rigidez del cable en el traslado de cargas.

Las realizaciones con banda tensada han ocupado casi exclusivamente las pasarelas de peatones o soportes para cintas transportadoras, pues las condiciones viales a las que estamos acostumbrados, para las velocidades usuales, son difícilmente cumplibles por la banda tensada. El puente sobre el arroyo Maldonado resulta extraordinariamente interesante, sirve para el paso de vehículos sin dejar de producir curiosidad y diversión a velocidades reducidas.

Finsterwalder, que recogió la idea de Viera, la ha aplicado a diversas realizaciones como la pasarela

Puente S. José. Costa Rica.

de Freibergo, con tres vanos de 39,5 m de luz pero fracasó en su intento de realizar el puente del Bósforo en tres vanos de 396 + 408 + 396 m.

En la misma idea pero con un cambio adicional tenemos el puente de S. José de Costa Rica de T.Y. Lin. En este puente vuelve a desdoblarse el elemento portante, en tablero y arco invertido de cuelgue.

Las flechas de la catenaria son mucho mayores, lo que reduce sustancialmente los problemas de fluencia de las bandas tensadas y mantiene la rasante de la carretera horizontal, la cual se refiere a la banda tensada por pilares en disposición similar a un puente con arco superior invertido. Únicamente las vinculaciones son diferentes pues mientras el arco con tablero inferior es una estructura exteriormente isostática, el puente de T.Y. Lin necesita anclar sus cables en el estribo para facilitar la construcción del tablero.

Pasarela de peatones. Es un ejemplo bien resuelto de las posibilidades de las bandas tensadas.

Puente sobre la Barra Maldonado (Viera).

Viera era un ingeniero heterodoxo y genial. Tenía planteamientos absolutamente asombrosos en cada cosa que tocaba y este puente es un bello ejemplo de ese proceder. Que sirva mal a la función que se espera del puente es, en este caso, lo de menos pues ha alumbrado una idea nueva.

Proyecto puente metálico del siglo XIX con el mismo esquema estructural que el puente de T.Y. Lin. Es difícil hacer un puente que no tenga un antecedente.