

Planteamiento general del diseño actual de puentes – Puentes heterodoxos



Javier Manterola.
Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos.

Resumen

Estamos en una etapa intermedia entre el clasicismo de los puentes de los años 60 y 70 del siglo XX y la no presencia de los puentes realizados con materiales de fibra de carbono, vidrio, de aramidas del siglo XXI.

Siempre se producen puentes heterodoxos en estas épocas intermedias, muchos malos, otros llenos de talento e invención.

Palabras clave: Heterodoxia, formas de arquitectos, abandono de lo mínimo, nuevas posibilidades.

Estamos viviendo una época intermedia en la concepción de puentes. En los años 60 del siglo XX no había dudas, había que trabajar y desarrollar los puentes de vigas prefabricadas para las luces pequeñas y medias y puentes contruidos en avance en voladizo para las luces medias y grandes, y ambas de hormigón. Al final de los sesenta se empieza a trabajar en los puentes atirantados, y ya, en los años 70, se produce el renacimiento de los puentes arco. El espectador atento veía como se sucedían procesos creativos de gran potencia y utilidad. No se podía, no se debía estar en otra cosa que no sea conseguir saltar los 100 m de luz con un puente de hormigón pretensado que seguía más o

menos de cerca al puente de Bendorf sobre el Rhin, o penetrar en el “intrínquis” de las losas aligeradas, en sus versiones diferentes para saber cómo funcionaba con suficiente rigor un puente oblicuo o curvo, la presencia de apoyos únicos, etc.

En construcción “in situ”, todo venía de Alemania; si la construcción era prefabricada, de Francia, y los demás nos esforzábamos en seguir la huella. Aún tardó algo en venir con fuerza la estructura mixta.

Mientras las configuraciones de hormigón se fueron optimizando, los sistemas de pretensado se fueron unificando y los procedimientos de puesta en obra mejorando, las configuraciones en estructura mixta empezaron a ofrecer sus ventajas tanto para las

luces cortas y medias como y sobre todo para las grandes luces.

Todo esto fue un proceso que ocupó décadas, en las cuales se llegaron a optimizar casi todas las configuraciones y en conocer qué era lo adecuado para cada caso. Se podría decir que para cada problema había una solución óptima y se conocía desde el principio, al enfrentarse con cada problema.

Se podía decir que el mundo de los puentes estaba cristalizado, fossilizado. Todo se reducía a conocer bien el catálogo de morfologías y de procesos constructivos para proyectar y construir bien.

En aquellos no tan lejanos años, los puentes normales se nos empezaron a ir de las manos a los diseñadores de puentes. Era difícil competir con una casa de prefabricación que te servía modelos bien diseñados y acoplados, rectos, curvos, apoyados o continuos, para todos los puentes de luces medias. Así los pasos superiores empezaron a salir de nuestras manos para convertirse en modelos que había que comprar en el supermercado de las diferentes casas de prefabricación. El puente de autopista se compraba y se compra "...mándame 25 pasos superiores de autopista y en cuánto tiempo los tendré montados".

Con las luces medias y grandes los diseños optimizados no eran tan fáciles, sobre todo porque había menos puentes que hacer de esos tamaños. El puente mixto empieza a cubrir gran parte de este espacio, luces de 60 a 100 m, pues era un puente que te lo montaban y construían, aunque en este caso aún necesitaba un diseñador.

Y podríamos seguir en este proceso de construcción de un gran catálogo de los puentes con los que uno se encontraba y en el que la tarea del ingeniero era la de ser un buen conocedor del mismo, y, por tanto, un buen elector del puente más adecuado para el sitio que se tenía.

Para las luces, mayores de 70 m u 80 m, el diseñador aún era importante, sobre todo cuando la presen-



Figura 1

cia de los puentes arco y atirantados no era tan general como para que se pudiese encontrar en un catálogo y resolver cualquier problema.

¿Es ésta la situación actual? Si no exacta, bastante parecida. Sabemos lo que hay, cómo se construye y lo que cuesta.

Si estuviésemos hablando de un estilo arquitectónico, de una tendencia artística, se diría que habíamos coronado la fase del clasicismo y nos encontramos claramente en el manierismo. Aparece "a la manera de...". La ortodoxia resistente no se cumple, se evita desde muchos puntos de vista. Lo estricto, lo mínimo, lo más barato, aquello que ha configurado nuestro entendimiento de los puentes durante muchos años se cuestiona. Varias veces ha puesto este ejemplo. Cuando en el siglo XVI se están construyendo, en estilo gótico tardío, las catedrales de Plasencia, la nueva de Salamanca y de Segovia, se conocían y bien la catedral de León, la de Burgos, etc. Las buenas catedrales góticas españolas y las francesas; y, sin embargo, sólo se podía hacer lo que hicieron. No pensaron en repetir la catedral de León en Salamanca. Los tiempos te impelen a realizar soluciones menos puras y algo decadentes, pero nuevas.

Y a esta parte voy a dedicar el res-

to de mi artículo: a esos puentes diferentes, más complejos, que serán recordados como ejemplo de lo que se hacía en un tiempo de decadencia, el existente entre el apogeo de la construcción en hormigón pretensado y la construcción mixta; y aquel otro en el que aún los nuevos materiales y las formas derivadas de su utilización no habían abierto el camino de lo nuevo.

Puentes heterodoxos

Lo heterodoxo es difícil de clasificar, simplemente hay que exponerlo, pensando además que, generalmente, mucho de ello está lleno de talento.

Y los hay de muchos tipos, por ejemplo los que enfatizan lo monumental dentro de una ortodoxia resistente. El puente de la Barqueta es un puente algo heterodoxo, pero clásico; el puente del Milenio de Zaragoza es claramente heterodoxo, se busca lo monumental, exagerando la luz, la anchura y las calidades. Esto se ha hecho muchas veces en la historia, enfatizar lo clásico para monumentalizarlo; y no está mal siempre que no se quiera confundir el legado de lo exagerado con lo ingenieril. Este puente no habría sido posible en los años 70. De cualquier manera es un viaducto espléndido (figura 1).

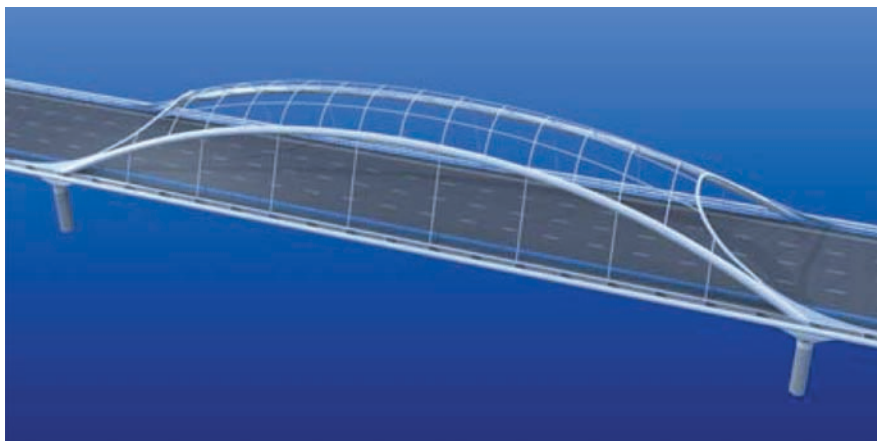


Figura 2.

Dentro del planteamiento de configuraciones resistentes ortodoxas, hechas heterodoxas por circunstancias ajenas, presento un proyecto en el que estamos en ello, ahora con Dragados, y que parece que va por buen camino para un puente en Miami (figura 2).

La forma del puente es totalmente clásica, un tablero metálico soportado por dos arcos superiores. Hasta ahí todo normal. Pero a mí siempre me han parecido desamparados los arcos superiores sueltos, razón por lo cual lo hemos inclinado uno hacia el otro. Aquí hemos dispuesto un tejido complementario, con escaso poder resistente, pero que constituye con los arcos un espacio brillante que, además, puede ser el soporte de un conjunto de “leds” que iluminan por la noche la bóveda que

configuramos. Es lo monumental lo que le proporciona aquí el carácter de heterodoxia. Posiblemente en el

próximo futuro se utilicen bastantes más estas características ajenas.

En otro tramo de este mismo proyecto, la planta es curva. Lo normal es disponer dos arcos planos que se nota que no siguen el trazado de la planta; sin embargo, si a este tejido se le proporciona rigidez horizontal, los arcos pueden ser curvos, acoplándose al trazado en planta de la calzada.

Podría decirse que otra obra espléndida, como el viaducto de Millau (figura 3), es una obra heterodoxa. Me acuerdo que cuando la vi, después de mi asombro, mi reflexión me llevó a la conclusión de que este puente era el fin de algo, más que el principio de algo. Todo en este puente está bien, el acoplamiento de la altura con la continuidad longitudinal, su diseño formal y resistente. El atirantamiento, al colocarse por encima del tablero para resistir no le va bien, estéticamente hablando, a un puente tan alto que sólo lo salva el hecho de que todas las configuraciones son iguales, cualquiera que sea la altura de las pilas.

Dos puentes muy parecidos conceptualmente, con la misma configuración estructural y constructiva, pero muy separados en el tiempo y la distancia son el puente de San José, Costa Rica de T. Y. Lin (197) y el puente de Ingolstadt sobre el Danubio, de Schlaich (1998), de 164 m de luz.



Figura 3.

Son puentes colgados, con cuelgue curvo bajo el tablero, hormigonado en el caso del puente de San José (figura 4), y con cables a la vista en el de Schlaich. Sobre ellos, por medio de elementos verticales, se soporta un tablero recto, cuya rigidez reposa en la del tablero propiamente dicho más la correspondiente al elemento de cuelgue, que es tanto mayor conforme menos flecha tengan los cables (figura 5).

Es, a fin de cuentas, una banda tesa donde están separados los cables de sustentación de la calzada de rodadura. La pasarelas de peatones son auténticas bandas tesas.

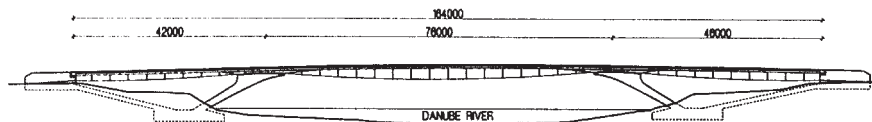
Ahora una pasarela, la del Miho Museum, de 120 m de luz (1998), con proyecto de I. M. Pei y Leslie E. Robertson; y, por otro lado, el puente de Obore Argen, de Schlaich, en los que se utiliza el atirantamiento superior e inferior a la manera de una viga continua de dos vanos. Atirantamiento superior, el correspondiente al apoyo; y, el inferior, a la zona de momentos positivos (figura 6).

En la pasarela del Museo Miho se utiliza un arco como soporte de los tirantes en la pila, planteamiento difícil de cumplir en los puentes por la gran rigidización que debe tener el arco, cuando la carga de los tirantes de un lado sea superior a los de otro. En el caso de una pasarela, con una sobrecarga mucho más uniforme, se puede. Schlaich, en un puente de autopista de 255 m de luz, utiliza el mismo principio, pero con la pila triangular. Los tirantes de la pila se anclan en el dintel, de cuyo punto salen los tirantes situados bajo el dintel. Esta espléndida idea, que produce pilas de la mitad de altura que las de un puente atirantado para la misma eficacia resistente, resulta escasa para el usuario. Este sólo ve una pequeña pila y un solo trozo atirantado. No ve el resto y no queda muy bien. El espectáculo que da el arco en la pasarela del museo Miho compensa la falta de la visión inferior del puente (figura 7).

Christian Menn es un ingeniero muy clásico, formidable seguidor de Maillart, en lo que se refiere a puen-



Figura 4.



ALZADO



Figura 5.

tes arco muy delgados, pero que, por otro lado, ha proyectado y construido dos puentes especiales y muy personales; el puente de Ganter, curvo en planta de 678 m de longitud, 170 m de luz máxima y 160 m de altura,

un puente atirantado con "velas" de hormigón como soporte del dintel (1980); y el muy sofisticado, complejo y refinado de Sunniberg, de 1999, con una longitud de 526 m, vano principal de 140 m y altura de pilas



Figura 6

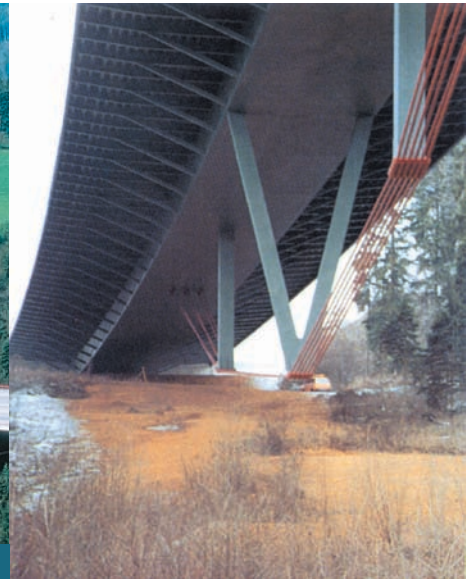


Figura 7.



Figura 8.

de 60 m. Es curvo en planta con un dintel muy delgado (figura 8).

Menn realiza un atirantamiento ex-

tradorsal, con pilas cortas sobre el dintel, condición estética imprescindible para que un puente continuo al-

to quede bien.

Bajo el dintel, las pilas son altas, tienen una altura de alrededor de 60 m. Sobre el tablero, la pila tiene una altura cuya relación con la luz del dintel es del orden del 10 al 15%. La forma de la pila es muy rígida, con el fin de que las pilas cortas prácticamente sean un anclaje fijo de los tirantes; y éstos sólo se deformen por elongación del acero. A la vez, se reduce el dintel a un espesor de 0,4 m con dos vigas laterales de 0,8 m. Esta extrema flexibilidad del dintel hace que los tirantes trabajen mucho, aun con esa pequeña altura sobre el dintel.

La curvatura en planta, $R=503$ m, le permite empotrar el dintel en las pilas y no necesitar junta de dilatación en el estribo, que es un punto fijo (no se si sólo fijo o empotrado); la dilata-

ción produce un desplazamiento transversal del dintel curvo, arrastrando a las pilas, cuya forma produce una gran flexibilidad transversal (sólo tiene dos riostras intermedias).

La heterodoxia de Menn no reside en planteamientos caprichosos que es capaz de resolver, sino en análisis rigurosos de los mecanismos resistentes habituales que cambia cuando le interesa.

Con la torsión, mejor dicho, con el acoplamiento que existe entre flexión y torsión en los dinteles curvos se pueden conseguir estructuras diferentes y diría que formidables. La pasarela atirantada de la Expo 2008 en Zaragoza, de 140 m + 90 m de luz, es un ejemplo de este acoplamiento. Se puede atirantar a un solo borde, pues la torsión se convierte en flexión, produciendo carga variable en los tirantes. Nunca hemos salido de las pasarelas en la aplicación de esta configuración; va a ser hora de hacerlo con puentes (*figura 9*).

Schlaich ha desarrollado un mecanismo obvio que se concretó, por primera vez, en la pasarela que existe dentro del Museo del Puente en Munich. La torsión puede ser resistida por dos fuerzas horizontales y opuestas. Como se ve en la *figura 10*, la curvatura en planta de los tirantes superiores y del tubo inferior desarrolla las cargas para que la ménsula elemental no gire bajo la influencia de la sobrecarga ¿Procede todo esto de la portentosa cubierta del estadio olímpico de Munich? Unos simples puntales habrían evitado el cable exterior curvo que introduce la carga horizontal en la ménsula, que ellos podrían introducir mucho más simplemente. Esta invención ha resuelto el problema de las cubiertas: desde el estadio olímpico de Sevilla, todas las alemanas, y el nuevo de la Peineta en Madrid, hasta todas las cúpulas *ten-grity* americanas (*figura 11*).

De nuestro trabajo presento dos puentes: el puente de Euskalduna y el puente de Galindo, los dos en Vizcaya.

El puente de Euskalduna, con tres luces de 75,4 m + 113 m + 175,4 m,



Figura 9.



Figura 10.

es una viga en Z constituida por una triangulación superior horizontal, otra vertical y una viga cajón inferior de 2,00 m de canto. La celosía vertical tiene 6,6 m de canto total. Su rigidez a flexión se consigue por el conjunto de los tres elementos, y la rigidez a torsión como suma de la rigidez de la Z más la del cajón inferior. El puente

está en una alineación recta y otra curva de 120 m de radio (*figura 12*).

Los problemas funcionales, dar cobijo a los peatones bajo la intensa lluvia de Bilbao, se convierten en definidores de unos mecanismos definidores de unos mecanismos resistentes eficaces.

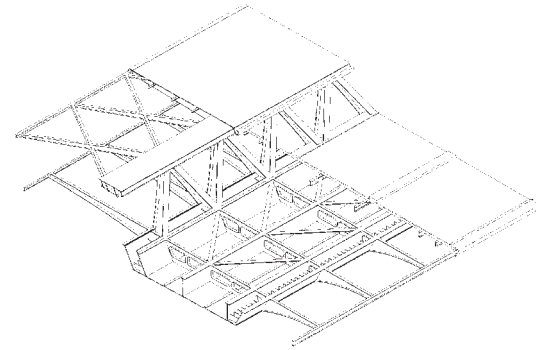
El puente sobre el río Galindo tie-



Figura 11.

ne un arco de 110 m de luz, es curvo en planta, con radio de 250 m. La antifunicularidad del arco curvo se consigue por un atirantamiento transversal cuyas fuerzas se convierten en torsión del tablero (*figura 13*).

La ingeniería francesa, la formidable ingeniería francesa, está cometiendo a mi entender un error. Cuando quiere hacer un puente especial, con un diseño nuevo, convoca un concurso entre arquitectos, como ha



PUENTE ELSKALDUNA

Figura 12.



Figura 13.



Figura 14.

ocurrido con los puentes del TGV Mediterráneo, supongo que asociados con ingenieros, y, eso sí, realizando el proyecto de construcción por el estudio de Greisch, de Bruselas. De Marc Mirham, arquitecto e ingeniero, autor de la excelente pasarela de Solferino, presento dos viaductos.

El viaducto del canal de Donzare: dos arcos continuos en *bowstring*, de 110 m de luz, y unidos en la parte superior por otro arco que se apun-tala sobre los dos arcos (*figura 14*). Sus estudios indican que la presen-cia del arco superior y los puntales



Figura 15.

rigidizan los dos arcos *bowstring* para cargas alternadas, estableciendo la continuidad entre ambos sin resultados espectaculares, lo que no nos invita a seguir ese camino.

El puente sobre el Mosa es un dintel continuo de 108 m de longitud, con dos vanos laterales de 28 m y 30 m, y un tramo central de 52 m soportado por un arco doble, sin otra conexión que la que iguala cortantes verticales (figura 15).

Los viaductos de Mornas y Mondragón, del arquitecto Jean Pierre Duval, son dos arcos desdoblados de 84 m y 121,4 m de luz principal, en su cruce sobre el Ródano, acompañados de dos largos viaductos de acceso. Los dos arcos duplicados están asociados por una serie de tirantes verticales, que después se prolongan hasta el tablero, y por una gran pieza central rígida en el centro de la luz de los dos arcos (figura 16).

Se hicieron varios estudios de conexión entre los arcos: desde dejarlo exclusivamente con péndolas verticales, como quería el arquitecto, a establecer una triangulación entre ellos, lo más eficaz y que vetó el arquitecto por antiestética, hasta llegar a un acuerdo entre ingenieros y arquitecto disponiendo la pieza, desgraciada pieza central, que unía entre sí los arcos que, a su vez, impedía los desplazamientos



Figura 16.

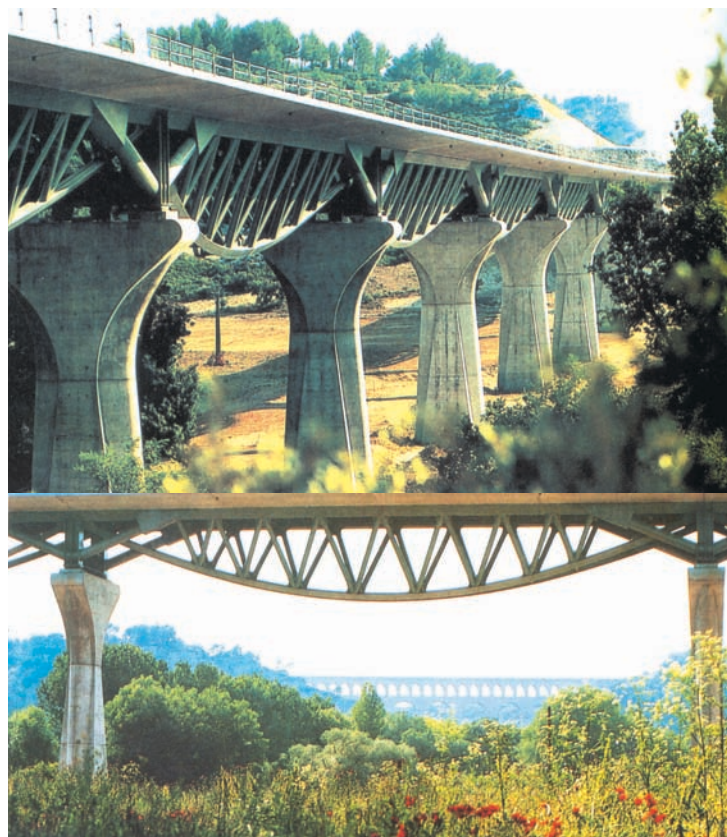


Figura 17.

longitudinales diferentes entre ellos.

El viaducto del Arco, del arquitecto Bruno Gaudin: se trata de 7 tramos rectos soportado por vigas en celosía en “vientre de pez” (figura 17), de 44,0 m de luz. Este diseño sustituiría a otro preliminar, bijácena. En la Memoria, el arquitecto dice: “La visión arquitectónica de la obra quería ser la de un hilo tendido

—expresión dinámica de un puente de alta velocidad— como un ala de hormigón perfilado que cruza el valle y desaparece detrás de la vegetación, el ala se apoya sobre un encaje de metal festoneado que deja pasar el aire del valle”. El extraño apoyo sobre las pilas tiene como misión dar continuidad longitudinal a las vigas en celosía, de 43 m de luz, y cantos que varían entre 3,72 m y



Figura 18.



Figura 19.

6 m. Mantener este apoyo sobre los estribos fue suprimido, pues a los proyectistas les parecía “contra natura”.

Otra obra francesa, cuya “heterodoxia” admito con gusto, pero no como lo que acabamos de ver. Se trata del viaducto Le Corbusier de Lille (*figura 18*), constituido por dos tableros que se apoyan sobre unos arcos inferiores, estructuralmente incorrectos, pero que crean un espacio bajo el puente agradable, en un espacio totalmente urbano.

Finalmente una obra de Calatrava, el puente de Murcia (*figura 19*), no de las más brillantes, pero sí la única que tenía a mano. Calatrava no añade ni ha añadido nada al mundo de lo resistente, pero formalmente está a diez años luz de estos puentes franceses. Dos puentes que me gustan, el acceso al puente de Alamillo y el puente sobre el Spree en Berlín, y el resto, perteneciente desde luego a este mundo de lo heterodoxo, brillantes, pero que, para mí, presentan el contrasentido de la conjunción entre la brillantez formal y la falta de consistencia resistente. No se puede ser tan bueno formalmente y no añadir nada al mundo de los puentes.

Curiosamente, Calatrava, con lo que gusta, ha sido muy poco copiado. ■