

PUENTES DE PARIS Y MADRID SOBRE EL RÍO GRAN VALIRA, EN ANDORRA

THE PARIS AND MADRID BRIDGES OVER THE RIVER GRAN VALIRA, IN ANDORRA

Leonardo Fernández Troyano

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado S.L. (Madrid, España)

Guillermo Ayuso Calle

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado S.L. (Madrid, España)

Persona de contacto: gayuso@cfcsl.com

PALABRAS CLAVE

esfera, mixto, atirantado, Andorra, barras

KEYWORDS

Sphere, composite structure, stayed cable, Andorra, bars

RESUMEN

Los puentes de París y Madrid están situados sobre el río Gran Valira en Andorra, el primero en el centro de Andorra la Vella, y el segundo como parte del nuevo acceso desde el sur a la ciudad.

Ambas estructuras han sido proyectadas con una serie de puntos en común: las plataformas de ambos puentes tienen formas irregulares; la sección hidráulica del río obligó en ambos casos a plantear una solución de estructura superior para conseguir un canto mínimo del tablero; y las estructuras debían tener una superficie estricta en planta, según las directrices fijadas por el “Ministeri d’Ordenament Territorial, Urbanismo i Medi Ambient”, que cubriera el río únicamente en las zonas definidas por las plataformas viales.

Bajo estas premisas, se ha planteado en ambos casos una solución con tablero mixto, atirantada mediante barras, que se anclan en dos esferas de 2,2 m de diámetro en el puente de París y en una esfera de 4 m de diámetro en el puente de Madrid.

ABSTRACT

The Paris and Madrid bridges are placed over the river Gran Valira in Andorra, the first one in the centre of Andorra la Vella, and the second one belongs to the new access from the south to the city.

Both structures have been designed with series of common features: the decks of the bridges have an irregular shape, in both cases maximum flood levels forced to fix a solution of upper structure to get minimum depth; and finally, both structures should have a strict area in plant, according to the guidelines set by the “Ministeri d’Ordenament Territorial I Urbanisme”, consist of covering the river only in those areas defines by the road decks.

Under these considerations, in both cases the final solution presented is a composite deck, cable-stayed by bars, which are anchored in two spheres of 2,2 m in diameter in the Paris bridge, and in one sphere of 4,0 m in diameter in the Madrid bridge.

RESUMEN AMPLIADO

Los puentes de París y Madrid están situados sobre el río Gran Valira en Andorra, el primero en el centro de Andorra la Vella, y el segundo como parte del nuevo acceso desde el sur a la ciudad.

Ambas estructuras han sido proyectadas con una serie de puntos en común: las plataformas de ambos puentes tienen formas irregulares; la sección hidráulica del río obligó en ambos casos a plantear una solución de estructura superior para conseguir un canto mínimo del tablero, dado que está canalizado a su paso por la ciudad y la capacidad de desagüe no podía modificarse; y las estructuras debían tener superficie estricta en planta según directrices fijadas por el “Ministeri d’Ordenament Territorial, Urbanismo i Medi Ambient” que cubriera el río únicamente en las zonas definidas por las plataformas viales.

El puente de París es un puente mixto compuesto de dos ramales: uno recto y esviado, y el otro curvo, que unen las calles Consell d’Europa y Dr. Mitjavila. La canalización del río en la zona del puente tiene un ancho entre los muros verticales de 22,6 m. Esta luz es la que debe salvar el ramal semicircular, y también el ramal oblicuo que da lugar a una luz real de 44,3 m. El tablero está colgado de dos esferas metálicas de 2,2 m de diámetro situadas en los vértices de un tetraedro formado por tubos de 660

mm de diámetro. De cada esfera se cuelga un ramal. El tablero está compuesto de tubos de 508 mm de diámetro en los bordes de los ramales, unidos mediante costillas en doble T, de 0,40 m de canto, que al llegar al tubo le abrazan. Sobre las costillas se sitúa una losa de hormigón que sirve de plataforma del puente y se conecta a las costillas, dando lugar a una estructura mixta.

El puente de Madrid es un puente mixto apoyado en sus cuatro bordes: en los dos estribos, y en los dos bordes libres mediante tirantes. El paso sobre el río es extraordinariamente irregular porque es oblicuo y curvo; y además los dos carriles que pasan sobre el puente se van separando, porque en la margen derecha van juntos, y en la izquierda hay una separación entre los ejes de 25 m. A esto se suma que el río en el tramo del puente también tiene planta curva. Todo ello da lugar a una plataforma irregular y oblicua sobre el río, con unas longitudes de los bordes libres de 55 y 60 m. Al apoyar el puente en los cuatro bordes se tiene una luz equivalente igual a la ortogonal al cauce, que en este caso son 21 m libres, que dan lugar a 23 m. entre apoyos. Se ha adoptado un canto de 0,80 m (0,60 de vigas metálicas + 0,20 de losa de hormigón), lo que da lugar a una esbeltez de $1/28,7$, que es extraordinaria para una obra de estas características.

Los dos bordes atirantados de la losa son curvos y divergentes. Por ello, dada la geometría irregular de los tirantes, se adoptó la solución de anclarlos en una esfera de 4 m de diámetro que permite que el anclaje de los tirantes en ella tenga cualquier geometría. En principio se pensó sustentar la esfera en cuatro patas apoyadas dos a dos en una y otra orilla, pero esta solución no fue viable porque no se pudieron hacer los apoyos de la orilla derecha, debido a la falta de disponibilidad de los terrenos necesarios para ello. Por ello se utilizaron únicamente dos puntos de apoyo en la orilla izquierda, lo que dio lugar a un bípode para apoyar la esfera. La estabilidad del bípode se consiguió mediante unos tirantes anclados a la roca de la ladera contigua al puente.

I. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LOS DOS PUENTES

Los puentes de París y de Madrid están situados sobre el río Gran Valira, en Andorra. El primero está situado dentro de la ciudad de Andorra la Vella (Figura 1), y el segundo cuatro kilómetros aguas abajo (Figura 2), en el acceso a la ciudad desde la frontera española.

Se puede considerar que ambos puentes forman una unidad, porque además de estar muy próximos, en el proyecto de ambos se han planteado problemas análogos, y por ello hay coincidencias en las soluciones que se han adoptado en ellos (Figura 3).

Sus características son las siguientes:

a) Los dos tienen plataformas irregulares sobre el río, con oblicuidades grandes que dan lugar a luces mayores que la sección normal del río.

b) El río Gran Valira está canalizado en su paso por la ciudad de Andorra la Vella, donde está situado el puente de París, y también aguas abajo de la ciudad, donde está situado el puente de Madrid. La sección de la canalización tiene un resguardo estricto sobre las avenidas máximas.

La canalización del río y las rasantes de las vías de tráfico definidas por los bordes de la canalización, obliga en ambos puentes a hacer el tablero con canto mínimo para disminuir lo menos posible la capacidad de desagüe en caso de avenidas. Por la misma razón no son admisibles pilas en el cauce.

c) De acuerdo con las directrices fijadas por el “Ministeri d’Ordenament Territorial, Urbanismo i Medi Ambient” del Gobierno de Andorra, las estructuras debían tener la superficie estricta en planta, es decir, no se debía cubrir el río en más zonas que las definidas por las plataformas viales. Esta condición elimina toda solución de tipo pérgola, que hubiera resuelto ambos casos con estructuras sencillas, pero que hubiera cubierto el río en longitudes grandes.

Para conseguir cantos mínimos en unos tableros irregulares como los de estos puentes, sin posibilidad de apoyarlos en puntos intermedios en el cauce del río como ocurre en ambos casos, es preciso apoyarlos en todo su contorno. Esto se consigue apoyando directamente sobre los estribos los bordes definidos por ellos, y apoyando elásticamente los bordes libres mediante tirantes. La irregularidad de los bordes da lugar a unas geometrías irregulares de los tirantes, sea cual sea el sistema de atirantamiento que se utilice. Esta irregularidad nos ha llevado a atirantar los tableros desde un elemento geométrico que permita cualquier geometría espacial de los tirantes. La figura geométrica que mejor resuelve este problema es la esfera, en la que se pueden anclar los tirantes en cualquier dirección que queramos fijar. Por ello en ambos puentes se han utilizado esferas para anclar los tirantes que soportan el tablero (Figuras 4a y 4b).

En los dos puentes, como hemos dicho, ha sido necesario hacer el tablero con una estructura de canto mínimo. Además se ha buscado una solución de estructura lo más ligera posible para facilitar su transporte y montaje. Por ello los dos tableros se han

hecho con estructuras mixtas, que han permitido montar inicialmente las estructuras metálicas, después los tirantes, y por último se ha hormigonado una losa de 0,20 m de espesor que define las plataformas viales.

Los planteamientos anteriores son comunes a los dos puentes y por ello se han buscado soluciones análogas en ambos. Sin embargo, las irregularidades de las geometrías de ambos tableros son distintas, y por ello las estructuras de los tableros y las de soporte de los tirantes son distintas en ambos puentes.

Vamos a estudiarlos cronológicamente, es decir, en el orden que se han proyectado y construido.

II. PUENTE DE PARIS

II. 1. Situación y condiciones del puente

El Puente de París cruza el río Gran Valira en la ciudad de Andorra la Vella, capital del Principado de Andorra.

Esta ciudad está situada en la confluencia de los dos ríos principales del país: el río Valira del Nord y el río Valira de Orient, que se unen al llegar a la ciudad para formar el río Gran Valira, que sigue hasta España donde desemboca en el río Segre. Esta configuración geográfica obliga a la mayor parte del tráfico del país a pasar por la ciudad, que está dividida por el río, y por ello ha sido necesario construir una serie de puentes sobre él. El último de ellos es el puente de París.

Este puente une dos calles de la ciudad, situadas en las dos orillas del río: la del Consell d'Europa en la margen izquierda y la del Dr. Mitjavila en la margen derecha. Estas dos calles son cuasi-paralelas al río, y la unión entre ellas consiste en enlazar los dos sentidos de tráfico de la calle del Consell d'Europa con un solo sentido de tráfico en la calle del Dr. Mitjavila. Esto ha dado lugar a un enlace singular en planta, formado por un ramal oblicuo y otro en semicircunferencia, que pasan de una orilla a otra del río (Figura 5).

La canalización del río en la zona del puente tiene un ancho entre los muros verticales de 22,6 m. Esta luz es la que debe salvar el ramal semicircular, y también el ramal oblicuo que da lugar a una luz real de 44,3 m.

La calle del Consell d'Europa está a la altura de la margen del río y muy próxima a él. La calle del Dr. Mitjavila está más separada del río, y a una cota inferior a

la canalización. Por ello, la rasante del puente viene definida por la calle del Consell d'Europa, lo que obliga, como hemos visto, a un canto mínimo del tablero.

Esta configuración especial de las vías de tráfico, sumado a que el nuevo puente está situado en una zona céntrica de la ciudad, ha llevado a adoptar una solución original que se pueda convertir en un elemento de referencia en la zona, como símbolo de la Andorra actual.

Como hemos dicho, la geometría de los ramales obliga a una geometría irregular de los tirantes de cuelgue, y por ello los elementos de anclaje de los tirantes se han materializado en dos esferas, una por cada ramal. Estas dos esferas, de 2,2 m de diámetro y 40 mm de espesor, se conectan entre sí mediante un tubo de 660 mm de diámetro, y se apoyan en dos puntos, uno en cada orilla, con tubos que parten de las esferas, formándose así un tetraedro con los cinco tubos del mismo diámetro que forman la estructura (Figuras 6 y 7).

II. 2. Definición y estudio de la estructura

Como se ha dicho, la geometría del puente es muy singular porque tiene dos ramales que fue necesario colgar de dos puntos diferentes. La irregularidad del tablero y la configuración en forma de tetraedro de la estructura superior requirió, para equilibrar el sistema, disponer dos tirantes de retenida anclados a un punto fijo fuera del tablero, en una orilla del río, que estabilizan esta estructura superior para movimientos transversales, de forma que las flexiones en ella sean mínimas.

El tablero está apoyado verticalmente en seis apoyos, dispuestos dos en el lado de la calle del Doctor Mitjavila, dos en el ramal oblicuo y dos en el ramal curvo del lado de la calle Consell d'Europa.

La irregularidad del atirantamiento debida a la irregularidad del tablero, hace que las cargas horizontales que se producen en él no den resultante nula, lo que ha obligado a resistir estas cargas mediante apoyos verticales que las transmiten a los estribos. Por ello hubo que apoyar longitudinalmente y transversalmente el tablero, estableciendo uno de los estribos como fijo. Se fijó el estribo del lado del Consell d'Europa. Las coacciones horizontales se hicieron con apoyos verticales, en el estribo del tramo oblicuo, donde se apoya el tubo transversal, y la coacción longitudinal se hizo mediante cuatro barras en los apoyos. La geometría del tablero ha obligado a anclar verticalmente tres apoyos en el estribo de Doctor Mitjavila y cuatro en el de Consell

d'Europa, que eran los mismos que se fijaron longitudinalmente. Todos estos anclajes son registrables por si fuere necesario actuar en alguno de ellos.

El elemento más singular de este puente son las esferas donde se anclan los tirantes. Para el cálculo de estos elementos se realizó un modelo de elementos finitos tipo placa que reproducía la esfera y la rigidización interior. Como la geometría de los tirantes es diferente en cada uno de los ramales, hubo que estudiar cada una de las esferas por separado, aplicando en cada modelo las cargas de los tirantes obtenidas del modelo general.

Otro de los problemas singulares que se ha estudiado en esta estructura fue el de las vibraciones, porque debido a su geometría y a su canto reducido podían resultar fundamentales en el comportamiento y uso del puente. Para analizar este fenómeno se hizo un cálculo dinámico de la estructura paseando una serie de cargas a diferentes velocidades que nos dieron resultados satisfactorios en cálculo. Durante la construcción se observó que antes de poner el pavimento, el paso de camiones durante la prueba de carga por uno de los estribos producía vibraciones en el otro apreciables para los peatones. Este problema se solucionó una vez colocado el pavimento, porque su masa amortiguó las vibraciones.

II.3. Descripción del puente

II.3.1. Estribos

El puente se apoya en los muros de borde de la canalización, que son de hormigón en masa cimentados directamente sobre los acarrees. Las cargas adicionales que introducía el puente obligaron a recalzar la cimentación mediante micropilotes. Debido a la forma irregular del tablero, sus reacciones sobre los estribos son también irregulares, y por ello se producen en algunos puntos cargas ascendentes, y en otros cargas horizontales. El refuerzo de la cimentación se estudió teniendo en cuenta estas irregularidades.

II.3.2. Tablero

El tablero está formado por dos ramales, uno curvo, y el otro recto y esviado, que son independientes en la margen izquierda del río (calle del Consell de'Europa) y posteriormente se unen sobre el puente, llegando juntos a la calle del Dr. Mitjavila.

La estructura de este tablero está formada por tubos de contorno de 508 mm de diámetro y 25 mm de espesor, que bordean ambos ramales y están unidos entre sí por costillas en doble T de 0,40 m de canto (Figura 9). Estas costillas se abren en sus extremos para abrazar los tubos de borde. En la intersección de los ramales, los tubos se han sustituido por una viga en doble T de 0,40 m de canto, unida a las vigas transversales. Estas vigas transversales son paralelas entre sí y ortogonales al eje, en el ramal oblicuo y radiales en el ramal curvo (Figura 8). Las líneas de apoyo sobre los estribos se han resuelto también con tubos de 508 mm de diámetro, y a partir de estos tubos se han materializado los apoyos que, como hemos visto, son de diferentes tipos.

Al tener el puente un vano único, el tablero está simplemente apoyado en los estribos y por ello los giros que se producen durante el proceso de construcción son demasiado elevados para absorberlos únicamente mediante neoprenos, porque inicialmente la estructura metálica se monta completa sin atirantar. Esta condición llevó a utilizar rótulas metálicas hechas con orejetas y bulones pasantes situadas sobre apoyos de neopreno: las rótulas recogen los giros en la dirección principal, que son los grandes, y los apoyos de neopreno los giros en las otras direcciones.

El montaje de la estructura se planteó buscando simplificar al máximo el sistema de construcción: primero se montó la estructura metálica completa del tablero, luego se montó la estructura superior, y se atirantó el tablero en primera fase; por último se construyó la losa de hormigón y se hizo la segunda fase de tesado de los tirantes. Este proceso generó deformaciones grandes en la estructura metálica, que inicialmente es muy flexible.

La plataforma del tablero se ha resuelto mediante una losa de hormigón conectada a las vigas transversales, de forma que el conjunto es una estructura mixta, fundamentalmente en lo que se refiere a la flexión transversal. Esta losa se hormigonó sobre una chapa gredada colocada sobre las vigas metálicas.

Los tirantes atraviesan los tubos que forman la estructura longitudinal y que están situados en los bordes de los ramales. Se anclan bajo ellos con una chapa que se apoya en dos medias lunas metálicas.

II.3.3. Estructura superior

Como ya se ha dicho, el tablero debía tener canto mínimo, y esto obligó a colgar cada uno de los ramales de un punto. Estos puntos se materializaron mediante dos esferas metálicas de 2,2 m de diámetro y 40 mm de espesor, conectadas entre sí y a

la cimentación mediante tubos de 660,4 mm de diámetro, formando el conjunto un tetraedro. Las esferas están situadas a 13,40 m de altura sobre el tablero.

Los tirantes se han resuelto con barras en vez de cables para reducir al máximo las dimensiones de sus anclajes. La ventaja de las barras es que se pueden anclar con una tuerca, y por ello las dimensiones del anclaje se reducen al mínimo, lo que resultaba necesario en los anclajes de las esferas. Por ello se han utilizado barras de acero de alta resistencia con doble protección: funda de plástico y vainas de acero inoxidable. Los tirantes están formados por barras de 36 mm o de 50 mm de diámetro, según las cargas a resistir.

Un problema singular que hubo que resolver, fue el sistema de anclaje de los tirantes a la esfera. En principio se pensó que los anclajes de las barras se situaran en su interior y hacer ésta accesible, pero esto planteó varias dificultades:

- La primera es que los anclajes tienen una disposición muy irregular, y esto daba lugar a que las chapas y tuercas de algunos de ellos se interfiriesen entre sí. Para solucionar esto eran necesarias esferas de mucho mayor diámetro.
- La otra dificultad es que los tirantes tienen que tener la posibilidad de sustituirlos, y para ello el interior de la esfera debía ser accesible. La dimensión prevista de la esfera de 2,2 m de diámetro no era suficiente para ello, debido a su rigidización interior que impedía el acceso a muchos de los anclajes, y esto obligaba también a ampliar su diámetro.

Para no aumentar el diámetro de las esferas se situaron los anclajes de los tirantes fuera de ellas. Para ello se diseñaron unos cilindros mecanizados que albergan en su interior unos huecos donde se sitúan las tuercas de anclaje. Los cilindros van roscados a unos tornillos que salen de las esferas, y llevan la dirección de cada tirante. Esta solución obligó a tesar los tirantes desde el anclaje inferior del tablero, lo que no planteó ningún problema.

Uno de los temas de proyecto que ha requerido más trabajo ha sido la definición geométrica de la estructura. Dada la forma en planta del tablero, y la disposición irregular de los tirantes, tanto en las esferas como en el tablero, se decidió realizar todo el dibujo del proyecto mediante un modelo tridimensional del que se obtuvieron todos los datos necesarios de geometría y replanteo. Uno de los puntos críticos fue la definición de los agujeros de las esferas, debido a que es pequeño el error

que permiten los tirantes, a pesar de que se ha previsto una holgura de giro en sus anclajes superiores.

II.3.4. Macizo de retenida

Para asegurar la estabilidad de la estructura se han dispuesto dos tirantes de retenida formados por barras de 50 mm de diámetro que se anclan en un macizo situado en el borde de la calle Consell d'Europa. Dicho macizo está anclado al terreno con 6 anclajes de 4 torones de 0,6", tesados al 40% de su carga de rotura. La carga inicial de estos anclajes se transmite al terreno mediante 6 micropilotes de 127 mm de diámetro y 10 mm de espesor. Para reducir lo más posible el número de micropilotes, el tesado de los anclajes se hizo en dos fases.

II.4. Proceso de construcción

El proceso de construcción de la estructura principal se hizo en las siguientes fases:

Fase 1.- Montaje de la estructura metálica del tablero

Fase 2.- Montaje de la estructura superior

Fase 3.- Tesado de los tirantes en primera fase

Fase 4.- Hormigonado de la losa

Fase 5.- Tesado de los tirantes en segunda fase

Fase 6.- Pavimentación, colocación de la barandilla y remates.

El tablero se dividió en cuatro partes para el montaje. La primera comprendía el tramo recto oblicuo, que se fabricó paralelamente al cauce del río en el lado de la calle Consell d'Europa, y una vez terminado se montó mediante una grúa (Figura 11). Posteriormente se montó una parte del tramo curvo formada por el tubo de contorno exterior y un tramo del tubo de apoyo sobre un estribo. La tercera parte incluía el otro tubo curvo, y la cuarta un tramo del tubo de apoyo del otro estribo. Después de empalmar estas cuatro piezas se soldaron las costillas del ramal curvo. Una vez terminada la estructura metálica del tablero se fijó a los estribos mediante las barras de anclaje.

La estructura superior se dividió en nueve piezas para el montaje: a) las cuatro piezas de fijación a los cimientos de los tubos de apoyo de las esferas; b) los cuatro tubos que sirven de apoyo a las esferas, excepto sus extremos; y c) las dos esferas junto

con el tubo que las une, y el arranque desde las esferas de los tubos de apoyo (Figura 12). En el empalme superior de los tubos de apoyo se colocaron unas bridas metálicas que se atornillaban inicialmente para fijar el conjunto. Los tubos se soldaron inicialmente a las piezas de arranque, después se empalmaron a las esferas y se retiraron las bridas. El montaje se hizo mediante tres grúas para sostener las esferas y los tubos.

Terminada la estructura metálica se tesó la primera fase de los tirantes, se hormigonó la losa, y se tesó la segunda fase, con lo que quedó terminada la estructura.

El puente se terminó en otoño del 2005 (Figura 10).

III. PUENTE DE MADRID

III.1. Situación y condiciones del puente

El puente de Madrid está situado en un nuevo acceso desde el Sur a la ciudad de Andorra la Vella.

Como hemos dicho, el río Gran Valira es consecuencia de la unión de los dos ríos principales de Andorra, el Valira del Nord y el Valira de Orient, y continúa hasta desembocar en el río Segre cerca de la Seu d'Urgell.

El valle del río Gran Valira es el acceso Sur al País, por donde llega todo el tráfico procedente de España, lo que da lugar a una intensidad alta de tráfico. Por ello, el tramo de este acceso más próximo a la ciudad de Andorra la Vella, situado en la margen derecha, se ha desdoblado por la margen izquierda. Este nuevo acceso requiere un puente para pasar de una margen a otra al iniciarse el desdoblamiento.

El paso sobre el río es extraordinariamente irregular porque es oblicuo y curvo; y además los dos carriles que pasan sobre el puente se van separando, porque en la margen derecha van juntos, y en la izquierda hay una separación entre los ejes de 25 m. A esto se suma que el río en el tramo del puente también tiene planta curva. Todo ello da lugar a una plataforma irregular y oblicua sobre el río, con unas longitudes de los bordes libres de 55 y 60 m.

Con una solución en pérgola, a la que ya nos hemos referido en el planteamiento general, tendríamos una longitud de ocupación del cauce del río de 120 m, por lo que se consideró inadecuado en una zona semiurbana como ésta, donde el gobierno andorrano quería un puente con un valor simbólico de puerta de llegada a la

ciudad de Andorra la Vella, que se encuentra a una distancia aproximada de 4 km (Figura 13).

Como ya hemos dicho, era necesario un tablero con el menor canto posible por exigencias de la sección hidráulica del río, y esto ha llevado a apoyar el puente sobre los dos estribos, y mediante tirantes en los dos bordes libres, lo que permite conseguir una luz equivalente del puente igual a la de la pérgola, es decir la ortogonal al cauce, que en este caso son 21 m libres, que dan lugar a 23 m entre apoyos. Se ha adoptado un canto de 0,80 m (0,60 de vigas metálicas + 0,20 de losa de hormigón), lo que da lugar a una esbeltez de 1/28,7, que es extraordinaria para una obra de estas características. Los problemas que plantea una esbeltez tan grande son los siguientes:

En primer lugar una vibración excesiva al paso de los vehículos; pero en este caso la irregularidad de la losa y su oblicuidad hacen que las vibraciones totales de la estructura sean reducidas.

En segundo lugar un exceso de material, en este caso de acero, para resistir las flexiones. La esbeltez adoptada ha dado lugar a que la cantidad de acero por metro cuadrado sea mayor de lo normal para un puente de estas características pero, como hemos dicho desde el principio, la exigencia de un canto mínimo ha sido esencial en este caso.

Hemos visto que se atirantan los dos bordes libres, que son curvos y divergentes. Por ello, dada la geometría irregular de los tirantes, se adoptó la solución de anclarlos en una esfera de 4 m de diámetro que permite fijarlos en ella con cualquier geometría.

En principio se pensó sustentar la esfera en cuatro patas apoyadas dos a dos en una y otra orilla, pero esta solución no fue viable porque no se pudieron hacer los apoyos de la orilla derecha, debido a la falta de disponibilidad de los terrenos necesarios para ello. Por ello se utilizaron únicamente dos puntos de apoyo en la orilla izquierda, y se creó un bípode para apoyar la esfera (Figura 14). La estabilidad del bípode se consiguió mediante unos tirantes anclados a la roca de la ladera contigua al puente (Figura 15).

Esta solución de un bípode estabilizado mediante anclajes es la que se ha utilizado en la noria gigante de Londres, sólo que en este caso los tirantes traseros se anclan en el suelo porque no hay ninguna ladera próxima.

III.2. DEFINICIÓN Y ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA

La forma en planta del tablero es similar a un paralelogramo de lados curvos, apoyado en dos de ellos en los estribos, y los otros dos colgados mediante barras que se anclan en la esfera. La esfera está referida al terreno mediante dos tubos metálicos de 1 m de diámetro. El bípode se estabilizó mediante tirantes anclados en la esfera y en la roca situada detrás del puente. Se dispusieron cinco tirantes formados por barras de 75 mm de diámetro, de acero de calidad 85/105. La dirección de los tirantes traseros se obtuvo del modelo general de cálculo de forma que el momento transversal fuera lo más pequeño posible. El anclaje de las barras en la roca se hizo con un macizo de hormigón en el que se fijan las barras, anclado a su vez al terreno con anclajes pretensados. En principio se pensó situar los anclajes en una línea horizontal, pero esta disposición tenía dos problemas:

1. La longitud del macizo es del orden de 10 m. Esto obligaba, a causa de la forma de la roca, a realizar una excavación muy grande para asegurar su apoyo.
2. El segundo problema es que la disposición horizontal introduce momentos transversales en el conjunto que producían una diferencia excesiva de carga entre los tirantes, hasta el grado de que en algunas hipótesis las barras de un extremo se comprimían y las del otro tenían cargas de tracción muy grandes.

Por estos motivos se decidió colocar el macizo verticalmente, de tal forma que se minimizaron los problemas anteriores, porque no se requirió excavar la roca, sino simplemente una preparación superficial; y se eliminaron los momentos transversales. Los tirantes forman un paraboloide porque en la roca se anclan en una línea vertical y en la esfera en una horizontal.

El estudio del macizo de roca afectado por los anclajes se estudió por medio de un modelo de elementos finitos para ver la distribución de tensiones bajo la acción de los anclajes al terreno y definir la longitud de los anclajes.

Al igual que en el puente de París, las fuerzas horizontales producidas por los tirantes en el tablero no se equilibran, y por ello se fijó el tablero a uno de los estribos longitudinal y transversalmente. La coacción transversal se realizó mediante dos ménsulas cortas metálicas dispuestas en la zona central del estribo, que se refieren a él mediante apoyos de neopreno en los dos sentidos. La coacción longitudinal se realizó mediante barras accesibles para su inspección.

El estudio de la esfera se hizo de la misma forma que en el puente de París. Se realizó un modelo de elementos finitos con elementos tipo placa, y para todo el tema de definición geométrica se dibujó toda la estructura en tres dimensiones.

También se realizó un estudio dinámico, porque como en el caso del puente de París, la geometría es muy singular, aunque en este caso al ser muy esviado los problemas debían ser menores. Se pasaron diferentes vehículos a distintas velocidades y se obtuvieron resultados admisibles. Durante la construcción, con el tablero parcialmente hormigonado, se vio que el paso de los vehículos de obra generaba vibraciones fuertes en la esquina opuesta. Estas vibraciones prácticamente desaparecieron cuando se hormigonó el tablero completo y se puso el pavimento.

III.3. DESCRIPCIÓN DEL PUENTE

III.3.1. Estribos

Igual que en el puente de París, el puente se apoya en los muros de borde de la canalización, cimentados igualmente sobre los acarrees. El muro de una margen estaba ya construido y el de la otra margen otro se hizo nuevo con una solución análoga. En ambos lados se reforzó la cimentación directa del muro mediante micropilotes.

III.3.2. Tablero

El tablero está formado por una superficie irregular con los cuatro bordes curvos que forman una figura que se aproxima a un rombo.

La idea inicial de la estructura del tablero era crear unas vigas principales metálicas en doble T de alma llena con una dirección próxima a la normal al cauce, aunque ello no es posible porque el cauce es curvo y las vigas principales se han hecho paralelas. Estas vigas principales se unen mediante unas vigas secundarias trianguladas, con dos direcciones, de forma que el tablero se convierte en un entramado triangulado en planta. Estas vigas secundarias sirven para el reparto de flexiones entre las principales, y para transmitir las fuerzas horizontales de los tirantes, porque para ello no era suficiente la losa de hormigón.

Del cálculo de esta losa triangulada en planta se obtuvo que la flexión en las vigas secundarias era mayor de lo esperado, lo que obligó a hacerlas también de alma llena, aunque con menor sección que las principales (Figura 17).

En los nudos de la triangulación se unen tres vigas, la principal y dos secundarias que llegan a él. Esto se resolvió en proyecto mediante dos semicilindros macizos soldados a los dos lados del alma de la viga principal que pasa por el nudo. A estos cilindros se soldaban las almas de las vigas secundarias. El taller metálico que hizo la estructura propuso sustituir los semicilindros por chapas cilíndricas de mayor diámetro, para facilitar la soldadura (Figura 19). El cálculo de los nudos en estas condiciones permitió hacer el cambio, lo que facilitó su fabricación.

Las vigas de borde a las que se anclan los tirantes, están formadas por unas vigas en C de sección irregular, con el alma inclinada para que coincida lo más posible con la inclinación de los tirantes. Estas vigas tienen más canto que las que forman el emparrillado de la estructura, y se unen entre si soldando las almas de las vigas del emparrillado al alma de la viga de borde.

El anclaje de los tirantes se hace mediante tubos unidos con una chapa a la viga de borde. Las barras de los tirantes se pasan por el tubo, y se anclan con chapa y tuerca en su extremo inferior (Figura 18).

III.3.3. Estructura superior

Como hemos visto, la estructura superior está formada por una esfera de 4 m de diámetro (Figuras 16a y 16b) donde se anclan los tirantes que soportan el tablero y los tirantes de compensación, que se anclan en el otro extremo a la roca. La esfera se apoya en un bípode formado por dos tubos de un metro de diámetro.

Igual que en el puente de Madrid, los tirantes se han resuelto con barras en vez de con cables, para reducir al máximo las dimensiones de los anclajes. Pero en este caso, dada la dimensión de la esfera, ésta es accesible y por ello los tirantes se han podido anclar en su interior. El acceso a la esfera se ha hecho mediante una tapa circular herméticamente cerrada.

Los tirantes están formados por barras de 50 mm o de 75 mm de diámetro, según la carga a resistir, y los que unen la esfera a la roca son todos de 75 mm. Todas las barras son de acero 85/105. Estos tirantes tienen doble protección: una funda de plástico adherida a la barra y una vaina exterior de acero inoxidable (Figura 20).

Igual que en el puente de Madrid, uno de los temas de proyecto que ha requerido más trabajo ha sido la definición geométrica de la estructura que se ha realizado también mediante un dibujo tridimensional de toda ella.

III.3.4. Apoyos de bípode

Cada tubo del bípode se apoya en un macizo de sección triangular a los que se anclan los tubos de los apoyos. Estos macizos se cimentan mediante micropilotes inclinados.

III.3.5. Anclaje al terreno de los tirantes de fijación de la esfera

Los tirantes de compensación de la estructura están formados por barras ancladas en un extremo en la esfera, y en el otro extremo en la ladera de roca contigua al puente, en la margen izquierda del río.

El anclaje a la roca, como hemos visto, se efectuó mediante un macizo de hormigón adosado a ella, del que parten los cinco tirantes que sujetan la esfera. Este macizo se fijó a la roca mediante 12 anclajes pretensados. Cada anclaje está formado por doce cables de 0,6" de diámetro. La geometría de la ladera da lugar a un contacto muy oblicuo entre el macizo de hormigón y la roca, lo que ha requerido aumentar la seguridad al deslizamiento entre ellos, mediante 14 anclajes pretensados al terreno adicionales, normales al contacto roca-hormigón. Estos anclajes están formados por barras de 32 mm de diámetro de acero 85/105.

La dificultad mayor que planteó el macizo de hormigón fue su construcción, porque debe alojar las cabezas de todos los anclajes y tirantes que parten de él, y los tubos correspondientes que atraviesan el macizo. Construir este elemento en medio de la roca, a una altura sobre el suelo de cerca de 20 m, no es tarea fácil. Por ello se decidió prefabricar el macizo en la misma obra (Figura 21a), y una vez terminado, se elevó mediante grúas a su posición definitiva (Figura 21b). Para ello primero se saneó la roca y se hormigonó una base con una superficie exterior plana donde se apoyó el macizo de hormigón. La junta entre el macizo y la base de hormigón se inyectó con resina epoxi. Una vez fijado el macizo, se perforaron los anclajes al terreno a través de los tubos del macizo.

III.3.6. Proceso de construcción

El proceso de construcción de la estructura principal se hizo en las siguientes fases:

- 1- Montaje de la estructura metálica del tablero.
- 2- Montaje de la estructura superior.

- 3- Tesado de los tirantes.
- 4- Hormigonado de la losa.
- 5- Pavimentación y remates.

El tablero se montó por parejas de vigas principales, unidas por su triangulación. Una vez montadas dos parejas de vigas contiguas se unieron in situ soldando la triangulación entre ellas (Figura 22a).

Para este montaje fue necesario hacer unos apoyos provisionales en el río, sobre los que se apoyaban unas vigas que servían a su vez de apoyo provisional de las vigas principales (Figura 22b). Terminadas las vigas principales se montaron las vigas de borde y se terminó el tablero.

La estructura superior se montó mediante unas torres provisionales que se apoyaban sobre un borde del puente, y por ello fue necesario hormigonar inicialmente una zona de la losa del tablero contigua al estribo. En estas torres se apoyaron las dos patas del bípode, y sobre ellas se montó primero la semiesfera inferior que se soldó a las patas del bípode, y posteriormente se montó la semiesfera superior, que se soldó a la inferior.

Una vez terminada la estructura superior se montó un tirante trasero que permitió retirar las torres provisionales, y posteriormente tesar alternativamente los tirantes del tablero y los de compensación.

El tesado de los tirantes permitió desmontar los apoyos provisionales, y hormigonar después la losa, que se hizo igual que en el puente de París, mediante una chapa grecada colocada sobre las vigas metálicas que sirve de encofrado (Figura 23). En este puente no fue necesaria una segunda fase de tesado de los tirantes. Únicamente se hizo una comprobación de las cargas finales después de hormigonada la losa, que coincidió suficientemente bien con las cargas teóricas.

El puente se terminó en otoño del 2006 (Figura 24).

FICHA TÉCNICA

Propiedad y dirección de obra: Govern de Andorra. Ministeri d'Ordenament Territorial, Urbanisme i Medi Ambient.

Director: Erón Estany Vidal

Subdirector: Esteve Comes Simona

Dirección de obra: Govern de Andorra. Ministeri d'Ordenament Territorial, Urbanisme i Medi Ambient.

Puente de París: Manel Riera Martínez

Puente de Madrid: Josep M^a Huertas Puigdemasa i Ramón Serra Vives

Proyecto: Carlos Fernández Casado S.L.
Leonardo Fernández Troyano
Guillermo Ayuso Calle
Suport, E.C, S.A.
Josep M^a Vila Brescó
Jaume Escolà Minguel

Dirección técnica de la obra: Suport, E.C, S.A
Josep M^a Vila Brescó
Carlos García Galera
Carlos Fernández Casado S.L.
Leonardo Fernández Troyano
Guillermo Ayuso Calle

Construcción:
Puente de París: CEVALLS
Pere Cadafalch
Puente de Madrid: TREBISA
Salvador Laguna de Pablo

REFERENCIAS

- [1] Fernández Troyano, L., Ayuso Calle, G.: Puente de París, en Andorra la Vella. Cauce 2000. Nº 135. Año 2007. pp. 60-67.
- [2] Laguna de Pablo, S.: Pont de Madrid. L'ART de VIURE andorra. Nº 59. Septiembre 2007. pp. 8-16.
- [3] Fernández Troyano, L., Ayuso Calle, G.: Puente de Mitjavila. III Congreso de Puentes y Estructuras de Edificación de ACHE. Zaragoza. Noviembre 2005.
- [4] Fernández Troyano, L., Ayuso Calle, G.: Puente de Madrid sobre el río Gran Valira, en Andorra. IV Congreso de ACHE. Congreso Internacional de Estructuras. Valencia. Noviembre 2008.