

PUENTE ATIRANTADO DE VIDALTA EN MÉXICO.

Leonardo FERNÁNDEZ TROYANO

Dr. Ingeniero de Caminos
Carlos Fernández Casado S.L.
Ingeniero de Caminos
cfcs1@cfcs1.com

Antonio CANO FERNÁNDEZ-CARRIÓN

Ingeniero de Caminos
Carlos Fernández Casado S.L.
Ingeniero de Caminos
acano@cfcs1.com

Lucía FERNÁNDEZ MUÑOZ

Ingeniero de Caminos
Carlos Fernández Casado S.L.
Ingeniero de Caminos
luciafm@cfcs1.com

José CUERVO FERNÁNDEZ

Arquitecto técnico
Carlos Fernández Casado S.L.
Calculista
jcuervo@cfcs1.com

RESUMEN

El puente Vidalta salva una barranca con unas condiciones especiales que han dado lugar a un puente atirantado singular con una sola torre.

La longitud a salvar por el puente es de 240 m, y solo se permite colocar una pila a 60 m de los edificios donde se inicia el puente, que divide el tablero en dos vanos de 60 y 180 m, desigualdad que se atenúa inclinando la torre de atirantamiento. Este desequilibrio se ha compensado también haciendo el vano lateral de hormigón y el principal metálico.

La inclinación de la torre genera una fuerza longitudinal en el tablero que se ha resistido con un jabalcón que une la base de la torre con el extremo del tablero, cerrándose así un polígono de fuerzas que solo transmite fuerzas verticales en los apoyos.

Este puente ha recibido el “award of excellence” de 2013 del Post-Tensioning Institute (PTI, USA).

PALABRAS CLAVE: Puente atirantado, estructura de hormigón y acero, torre única inclinada, tirantes paralelos, construcción en voladizos sucesivos.

1. Planteamiento general del puente

El puente Vidalta salva una barranca de grandes dimensiones de la ciudad de México, para dar acceso a un complejo de viviendas situado en uno de sus bordes.

La barranca es un espacio natural dentro de la ciudad con una potente vegetación de árboles y arbustos, que se debe proteger al máximo. Por ello, la primera condición que debía cumplir el proyecto era alterarla lo menos posible. Solo se podía colocar un apoyo en ella, y debía estar situado lo más cerca posible de los edificios. La posición de este apoyo ha dado lugar a un puente con dos vanos de 60 y 180 m de luz.

La dimensión del vano principal y la exigencia de dejar la barranca lo más diáfana posible, llevó a buscar una estructura con tablero de canto mínimo, para conseguir un puente ligero. Esto como mejor se consigue es con soluciones de estructura superior (colgada, atirantada, o arco) y entre ellas la más adecuada a las luces de este puente es la atirantada, que tendrá una sola torre situada sobre el apoyo intermedio.

La acusada diferencia entre los dos vanos del puente, el principal es tres veces mayor que el lateral, es el principal problema que se ha planteado en este proyecto, por la dificultad que supone equilibrar las fuerzas que los tirantes generan en la estructura. Por ello, para disminuir en lo posible la diferencia entre los dos vanos, se ha inclinado la torre situada entre ellos, hacia el vano principal de forma que el apoyo del tablero sobre ella, lo divide en dos vanos algo más equilibrados, de 78 y 162 m de luz.

El tablero tiene 10,70 m de ancho útil para dos carriles de circulación, y se atiranta en los bordes desde las dos pilas que forman la torre, que se inclinan ligeramente en su plano para encajar la geometría de los tirantes, tablero, y torre, y también para abrir hacia arriba la visión del conductor y reducir la sensación de angostura que producen los dos planos de tirantes. En cada uno de estos planos hay dos haces de tirantes, el delantero y el trasero, y los tirantes de cada haz son paralelos entre sí.



Figura 1. Vista aérea del puente.

2. Estructura del puente

Una condición básica de los puentes atirantados es que la resultante de los tirantes delanteros y la de los traseros se compensen, dando lugar a una resultante que debe coincidir sensiblemente con el eje de la torre. En este caso esta resultante será inclinada y por ello tendrá una componente horizontal, que será igual y contraria a la que aparece en el tablero, porque las fuerzas que los tirantes producen en él son iguales y contrarias a las que producen en la torre. Por ello nos encontramos con una fuerza longitudinal en el tablero que se deberá transmitir a tierra. La solución más adecuada es transmitirla a la base de la torre porque, sumada a la resultante de ésta, la fuerza que se transmite a cimientos es vertical. Esta transmisión se ha resuelto mediante un jabalcón que une la base de la torre con el extremo del vano de compensación, donde se sitúan también dos pilas cilíndricas verticales adosadas al edificio. De esta forma se genera un polígono de fuerzas que equilibra el sistema, formado por la torre, los tirantes, el tablero, el

jabalcón y las pilas verticales, completado con los otros dos apoyos del tablero: el apoyo sobre la torre, y el del extremo del vano principal sobre el estribo. Los apoyos sobre la torre y sobre el estribo son deslizantes, y las pilas de apoyo del extremo del vano de compensación forman un nudo rígido con el tablero y el jabalcón.

Como hemos visto, una condición básica de los puentes atirantados es que las fuerzas de los tirantes se equilibren en la torre, lo que define las cargas de los tirantes de compensación a partir de las cargas de los tirantes delanteros.



Figura 2. Puente de Vidalta.

Otra condición básica de los puentes atirantados es que las componentes verticales de las fuerzas de los tirantes se equilibren en lo posible con las cargas del tablero, para reducir al mínimo las flexiones en él. Esta es la razón de ser del puente atirantado. Pero este equilibrio no se consigue si los vanos del puente son desiguales porque uno pesa más que el otro. Para conseguir el equilibrio la única posibilidad es que el peso de los vanos sea diferente, haciendo más ligero el grande y más pesado el pequeño. Por ello en este puente el vano principal se ha hecho metálico y el de compensación de hormigón. La estructura del vano metálico está formada por un cajón de las dimensiones requeridas por los esfuerzos que actúan en él. Una vez dimensionado este vano, la sección del tablero del vano de hormigón se ha dimensionado para que su peso compense el del vano principal, consiguiéndose así el equilibrio de la estructura. También son de hormigón la torre, el jabalcón, las pilas cilíndricas verticales y el estribo. El tablero, el jabalcón, y las pilas cilíndricas tienen armadura principal activa. La torre y el estribo tienen solo armadura pasiva.

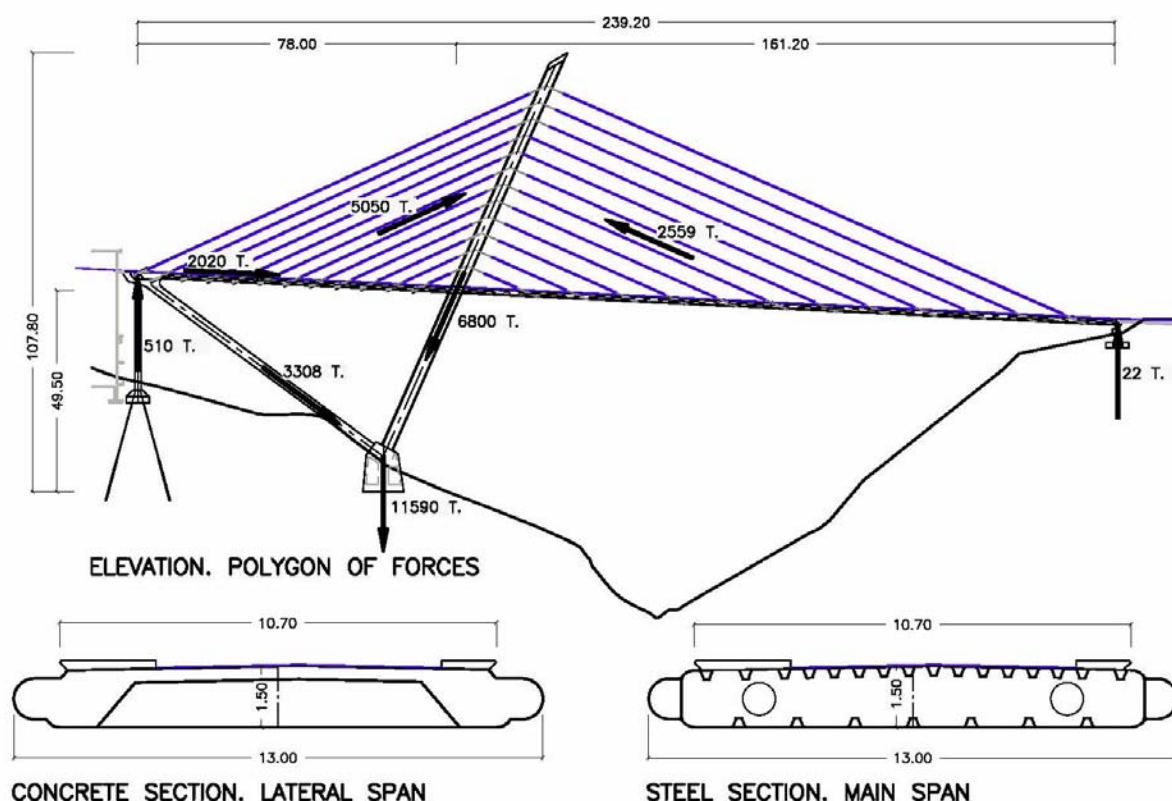


Figura 3. Diagrama del polígono de fuerzas del puente y secciones transversales.

3. Descripción del puente

El puente se compone de tres elementos principales: el tablero, la torre, y el jabalcón. Los extremos del tablero se apoyan sobre las pilas circulares y sobre el estribo.

3.1. Cimientos de la torre y el jabalcón

Como hemos visto, la resultante de las fuerzas axiales de la torre y del jabalcón, da lugar a una carga vertical a cimientos. La cimentación es directa, con una profundidad en el terreno de 8 m debida a la inclinación de éste, y se resuelve mediante un cajón hueco con diafragmas interiores sobre el que se apoya la torre por un lado, y el jabalcón por el otro. La base de apoyo tiene 17x10 m de superficie.

3.2. Torre

La torre tiene una longitud total de 106,6 m, y una altura desde cimientos al extremo superior de 97 m, que se divide en 38 m desde cimientos a los apoyos del tablero sobre la riostra, y 59 m desde los apoyos hasta su coronación. Está formada por dos pilas inclinadas hacia el vano principal en el plano del eje del puente, y ligeramente inclinadas hacia el exterior en su plano. Están unidas por una riostra transversal sobre la que se apoya el tablero.

Las pilas tienen una sección pseudocuadrada de 3 m de lado con un rebajamiento en las caras anterior y posterior. Es una sección en cajón, con una galería interior de 1,50x2,30, en la que se alojan los anclajes de los tirantes. Entre cada dos niveles de anclajes esta galería tiene unos diafragmas pretensados que unen las caras de los anclajes. Con ellos se reduce la flexión transversal de las paredes del cajón, y se resiste la tracción debida a los anclajes opuestos.

La sección de las pilas es constante en toda su longitud salvo en el estrechamiento que se produce en la galería a la altura de la riostra y del tablero.

La armadura longitudinal de la torre es pasiva en toda su longitud. La transversal está reforzada con una armadura activa formada por barras, que resisten las tracciones transversales debidas a los anclajes de los tirantes.



Figura 4. Vista aérea del puente.

3.3. Jabalcón

El jabalcón está formado por dos vigas inclinadas de sección cuadrada de 2,20 m de lado, y una longitud desde cimientos al nudo de unión con el tablero y las pilas verticales de 69,5 m. Tiene un aligeramiento circular de 1,10 m de diámetro, y una armadura principal activa para resistir la flexión de peso propio debida a su luz.

3.4. Pilas verticales

Las pilas verticales son dos cilindros de 1,50 m de diámetro sobre las que se apoya el nudo de unión del tablero con el jabalcón. Estas pilas son necesarias para el equilibrio del sistema porque la fuerza horizontal que, como hemos visto se genera en el tablero, se descompone en el nudo rígido formado por el tablero, el jabalcón y estas pilas, en una fuerza de compresión en el jabalcón, y una de tracción en las pilas verticales de forma que su suma debe ser igual a la fuerza horizontal del tablero. Por ello estas pilas tienen una armadura activa en toda su longitud hasta cimientos, que a su vez se anclan al terreno mediante anclajes pretensados.

3.5. Tablero

El tablero tiene 10,70 m de ancho útil, prolongado en los dos bordes mediante unos semicírculos, donde se anclan los tirantes; tiene un canto de 1,50 m. Longitudinalmente se divide en dos tramos

claramente diferenciados, el de hormigón y el metálico, aunque su canto y la forma de los bordes es la misma, por lo que hay una continuidad formal a lo largo de todo el tablero, con la diferencia de material porque, como hemos visto, el vano principal es metálico y el lateral de hormigón.



Figura 5. Puente en construcción, dovela metálica.

El tablero metálico es un cajón rectangular prolongado con los elementos de anclaje de los tirantes, con diafragmas verticales de chapa cada 3 m, y rigidizadores longitudinales trapeziales en chapa superior e inferior, con la separación necesaria en la superior para conseguir una losa ortótropa para la rodadura de los vehículos. Los tirantes se anclan en los elementos semicirculares laterales del cajón, en unos tubos que transmiten la carga al cajón mediante diafragmas.

El tablero de hormigón está formado por dos vigas longitudinales en los bordes, unidas por la losa superior y costillas transversales. Como hemos visto, la sección de hormigón está dimensionada por el peso que debe tener para equilibrar las fuerzas verticales de los tirantes. Éstos se anclan en la misma posición de la sección que en el tramo metálico.

Un elemento especialmente complejo del tablero es el nudo extremo donde confluye el tablero, el jabalcón y las pilas verticales, tres elementos con armadura activa, porque las pilas cilíndricas tienen tiro y el jabalcón y el tablero flexión.

La unión entre el tramo del tablero de hormigón y el metálico se realiza a dos metros del apoyo en la torre, con una zona de conexión de 3 m de longitud donde el cajón metálico se hormigona interiormente, y se conectan ambos materiales para transmitir las solicitaciones, especialmente el axil, del tramo de acero al de hormigón.

3.6. Apoyos

Como hemos visto, la unión del extremo del tablero con el jabalcón y las pilas verticales es un nudo rígido donde se equilibra el sistema de fuerzas de la estructura.

El tablero además de en este nudo, se apoya sobre la riostra que une las dos pilas de la torre, y sobre el estribo del extremo del tablero.

Los apoyos del tablero sobre la torre son todos deslizantes: tiene unos horizontales sobre la riostra para transmitir las cargas verticales, y otros verticales entre los bordes laterales del tablero y las pilas de la torre, para resistir las fuerzas horizontales transversales que se generan debidas al sismo.

El apoyo del tablero sobre el estribo es oblicuo, lo que da lugar a cargas ascendentes y descendentes en él. Por ello los apoyos se han resuelto mediante bielas metálicas ancladas en el tablero y en el estribo, que permiten los desplazamientos longitudinales, y resisten las fuerzas de compresión o de tracción en ellos. Además de las bielas se han dispuesto apoyos verticales en los

bordes del tablero igual que en la torre, para resistir las fuerzas horizontales transversales debidas al sismo.

Los efectos sísmicos transversales se resisten mediante el nudo rígido del extremo del tablero, y mediante los apoyos en la torre y en el estribo. Los efectos longitudinales se resisten mediante el mismo polígono de fuerzas que equilibran las cargas horizontales en el tablero.

4. Proceso de construcción

La singularidad de la estructura de este puente ha obligado a un proceso de construcción también singular para mantener el equilibrio de las estructuras parciales. Las etapas de este proceso han sido las siguientes:

- I. Construcción de los cimientos y las pilas verticales.
- II. Construcción de los jabalcones sobre cimbra.
- III. Construcción del primer tramo de la torre, desde cimientos hasta la altura del tablero. Se construyó con encofrados trepadores, y para resistir los esfuerzos debidos a su inclinación se atirantó a varias alturas desde los jabalcones.
- IV. Construcción del tablero de hormigón sobre una cimbra formada por unas vigas metálicas apoyadas en unas torres sobre los jabalcones, que a su vez transmitían la carga al terreno mediante unas torres inferiores.

Una vez terminado el pretensado del tablero, se dejó éste apoyado únicamente en las torres verticales.

- V. Montaje del tablero metálico, construcción del tramo superior de la torre y montaje de los tirantes.

El tablero metálico se montó por voladizos sucesivos, desde la torre hasta el estribo opuesto con dovelas de 6 m de longitud. Los tirantes se anclan cada 12 m y por tanto una dovela tiene anclaje de tirantes y la siguiente no.



Figura 6. Puente en construcción, carro de avance.

El montaje de las dovelas metálicas, la construcción del tramo superior de la torre, y el montaje y tensado de los tirantes se hizo en ciclos que requerían construir un tramo de 4,38 m de la torre con encofrados trepadores, montar dos dovelas del tablero de 6 m, y montar y tensar una pareja de tirantes delanteros y otra de traseros.

Este ciclo era obligado porque como en todo puente atirantado, el voladizo libre requiere atirantarlo lo antes posible para reducir los esfuerzos en él. Y en este puente en particular, la inclinación de la torre no permite avanzar su construcción sin estabilizarla con los tirantes.

Una vez terminado el voladizo del tablero se fijó al estribo, y quedó terminado el puente.

La construcción del puente se realizó por la empresa mexicana MEXPRESA.