

II CONGRESO DE ACE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

Realizaciones, Puentes



**Puentes arco sobre el río Nervión en Bilbao
para el ferrocarril metropolitano de la ciudad**

Leonardo Fernández Troyano

José Cuervo Fernández

Lucía Fernández Muñoz

Celso Iglesias Pérez

Agustín Sevilla Bayal

Carlos Fernández Casado S.L.

PUENTES ARCO SOBRE EL RÍO NERVIÓN EN BILBAO PARA EL FERROCARRIL METROPOLITANO DE LA CIUDAD

PROPIEDAD:	IMEBISA <i>Agustín Presmanes, José Ramón Madinabeitia, Francisco Borde, José M^a Gutiérrez</i>
PROYECTO:	CARLOS FERNÁNDEZ CASADO S.L.
CONSTRUCCIÓN:	UTE BOLUETA (CONSTRUCCIONES SOBRINO/ FERNÁNDEZ CONSTRUCTOR) <i>Miguel Hermoso, Roberto Casado</i>
ASISTENCIA TÉCNICA:	FULCRUM <i>Manuel Blanco, Valentín Gómez</i>
ABATIMIENTO DE LOS ARCOS	LASTRA IBÉRICA <i>José M^a Martínez</i>

1.- INTRODUCCIÓN



Leonardo Da Vinci definía el arco como *“una fortaleza causada por dos debilidades....está compuesto por dos cuartos de círculo, cada uno debilísimo por sí tiende a caerse y de esta forma se oponen a la misma el uno del otro, las dos debilidades se convierten en una*

única fortaleza”. Pensamos que no hay mejor ilustración de esta definición dual del arco, que el sistema de construcción utilizado en los dos arcos de los puentes sobre el río Nervión para el ferrocarril Metropolitano de Bilbao.

El procedimiento consiste en construir los dos semiarcos en una posición cuasi vertical sobre los salmeres, y posteriormente, mediante un tirante de retenida, girar los semiarcos hasta unirlos en clave. En este sistema de construcción es fundamental el estudio de los semiarcos en los estados intermedios porque, como decía Leonardo, son muy débiles hasta que no se unen en clave.

La mayoría de los procedimientos de





construcción que han aparecido sucesivamente en los puentes, se utilizaron primero en puentes metálicos y luego en los de hormigón. Sin embargo no conocemos ningún arco metálico donde se haya utilizado el procedimiento de girar los semiarcos. Sí se ha utilizado, en cambio, en los arcos de madera que sirvieron de cimbra para hormigonar los arcos de 69 metros de luz del puente *Longeray sur Rhône*, y el arco del puente de *Saboya* de 80 metros de luz.

En los arcos de hormigón el primero que utilizó este procedimiento fue Ricardo Morandi en la pasarela del Torrente Lussia en Italia, de 70 metros de luz, terminada en 1953. Posteriormente, en 1954, lo utilizó en el puente sobre el río Storms en Sudáfrica, un arco de 100 metros de luz. En el año 1987 se utilizó de nuevo para construir el arco del puente de Argentobel en Alemania, de 145 metros de luz.

La construcción mediante el abatimiento de los semiarcos es un método alternativo al de construcción por voladizos sucesivos atirantados, bien hormigonados in situ, o bien hechos con dovelas prefabricadas, sistema que se utiliza con frecuencia para construir arcos sin cimbra y especialmente en los de grandes



luces. En nuestro caso hemos preferido el sistema de semiarcos girados, en vez de hacer los semiarcos por voladizos sucesivos atirantados, por dos razones:

1. En primer lugar porque pensamos que para la luz de estos arcos, alrededor de los 60 metros, los medios necesarios para efectuar el giro no son muy potentes, y en cambio montar todo el sistema de voladizos atirantados nos parece excesivo para unos semiarcos tan cortos.

2. En segundo lugar porque se trata de dos puentes arco que, aunque no son exactamente iguales, todos los medios de montaje sirven para los dos puentes, lo que abarata su proceso de montaje.

2.- SITUACIÓN DE LOS PUENTES

Los dos puentes arco sobre el río Nervión están situados en el tramo Bolueta-Etxebarri del ferrocarril metropolitano de Bilbao. Este tramo se inicia en la estación de Bolueta (en servicio desde hace cuatro años) y discurre casi totalmente en superficie, siguiendo el antiguo trazado del ferrocarril Matiko-Azbarren.

El tramo se inicia con el primer puente sobre el río Nervión, cuyo estribo de margen derecha es el extremo de la estación de Bolueta. Al final del puente, en la margen izquierda, el trazado continua con un túnel que atraviesa la montaña comprendida entre los dos lados del meandro que forma el río, y sale en el otro extremo al estribo de margen izquierda del segundo puente.

3.- DESCRIPCIÓN DE LOS PUENTES



Los dos puentes sobre el río Nervión son para el ferrocarril metropolitano de Bilbao, que tiene un ancho de vía de 1,00 metro. Ambos puentes son para vía doble, con un ancho de plataforma de 8,50 metros.

La estructura de los dos puentes está organizada en dos nervios, uno bajo cada vía, unidos por la losa superior. En las zonas del tablero formado por vigas, los dos nervios son dos vigas cajón, y en la zona del arco, son dos anillos.

El paso sobre el río se resuelve en los dos puentes mediante un arco. El del Viaducto 1 tiene 63 metros de luz y el del Viaducto 2 tiene 56,5 metros de luz. Estas luces son pequeñas para un arco, y por ello admite diferentes soluciones. En estos puentes se ha adoptado una solución que podemos considerar en el límite entre el arco y el pórtico, porque el tablero se apoya en el arco únicamente en la zona central, donde son solidarios. Los apoyos siguientes del tablero están situados sobre las cimentaciones del arco.

En esta solución se puede enfatizar más su carácter de arco, como se ha hecho en este caso, o su carácter de pórtico, como se ha hecho en muchas ocasiones. Es su forma más que su estructura la que nos hace incluir estos puentes en los puentes arco, porque, como hemos dicho, están en el límite entre los arcos y los pórticos.

3.1. Puente 1



El Puente 1 está formado por un arco sobre el río Nervión de 63 metros de luz, que se prolonga en la margen derecha con un viaducto de acceso de 5 vanos de $22+3 \times 24,50+24$ metros de luz, y en la margen izquierda con un vano de 19,50 metros de luz.

El viaducto margen derecha está formado por dos vigas continuas en cajón de canto constante de 1,60 metros, unidas por la losa superior, y está apoyado sobre pilas en V, solidarias al tablero y articuladas en la base mediante apoyos de neopreno.

El arco está formado por dos anillos que coinciden con las vigas situadas bajo cada una de las vías.



El tablero es solidario del arco en los 30 metros centrales, y se apoya en los extremos de éste sobre pilas inclinadas que parten de las cimentaciones del arco. Todo el tablero está armado mediante armadura activa, necesaria también en la zona del arco, porque, como hemos visto, es una

estructura intermedia entre el arco y el pórtico, y por ello las flexiones en el tablero son significativas.



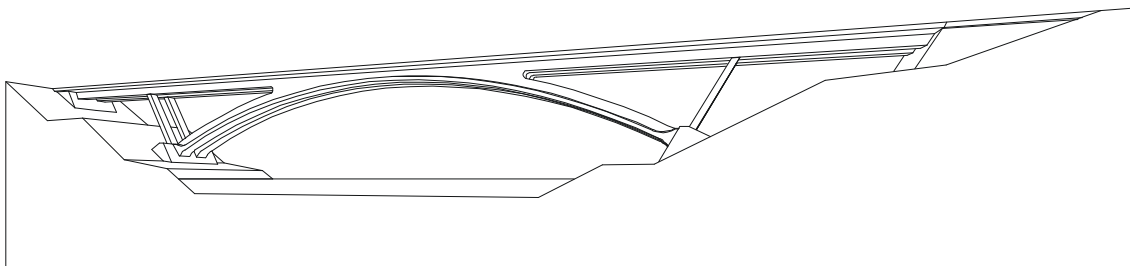
Los arcos son biempotrados, y se cimentan directamente sobre marga mediante macizos de hormigón; el más profundo se hizo hueco interiormente, mediante dos células que se rellenaron de material granular. Los viaductos de acceso se cimentaron sobre

pilotes de 1 metros de diámetro.

Este puente se apoya sobre neoprenos en los estribos y las pilas en V. Las pilas inclinadas de los extremos del arco son solidarios de las cimentaciones y del tablero. Las fuerzas horizontales debidas al frenado se resisten mediante los arcos y las pilas inclinadas.

La operación de girado de los arcos de este puente se hizo a mediados de Noviembre de 2001 y se terminó en Marzo de 2002.

3.2. Puente 2



El Puente 2 está formado por un arco de 56,5 metros de luz, prolongado en cada extremo por un vano de 15,50 metros de luz.

Igual que el Viaducto 1, el arco está formado por dos anillos situados debajo de las vías. El puente cruza oblicuamente el río, y esta oblicuidad se ha resuelto desfasando longitudinalmente los dos anillos del arco.

Este puente se encuentra actualmente en construcción.

4. CONSTRUCCIÓN DE LOS PUENTES

4.1. Construcción del viaducto de acceso del Puente 1



El viaducto de acceso del Puente 1 es una viga continua de cinco vanos, que se construyó por fases sobre cimbra; cada fase incluía $\frac{3}{4}$ de un vano y $\frac{1}{4}$ del siguiente. La continuidad del pretensado se resolvió mediante acopladores.

4.2. Construcción de los arcos

En el proyecto inicial, la construcción de los arcos se planteó mediante una cimbra con un apoyo provisional en el centro del río, porque su caudal permitía hacerlo así; de hecho el puente del ferrocarril anterior tenía una pila en el centro. Pero este procedimiento no fue admitido por la Confederación Hidrográfica que tiene a su cargo el río Nervión, que no quería ninguna alteración del cauce, y ello obligó a plantear un sistema de construcción evitando la cimbra. Como hemos visto en la introducción, se adoptó la solución de construir los semiarcos en posición cuasi vertical sobre los salmeres mediante un encofrado trepador, de la misma forma que se construyen las pilas de un puente de 30 metros de altura. Una vez terminados los semiarcos se abaten hasta unirlos en clave girándolos sobre unas articulaciones provisionales situadas en los arranques.

La posición inicial de los semiarcos debe ser lo más vertical posible para facilitar su construcción. Además es conveniente para la estabilidad del conjunto que la vertical del centro de gravedad del semiarco quede fuera del vano del arco, para que el par de vuelco tienda a apoyarlo sobre el trasdós.





Los semiarcos se apoyan en la base sobre las articulaciones provisionales que sirven para efectuar la operación de girado, y por ello requieren un bloqueo provisional para asegurar su estabilidad durante su construcción. Este bloqueo se ha hecho mediante unos

diafragmas de hormigón situados en el trasdós de los semiarcos y empotrados en las cimentaciones de los arcos. Estos diafragmas se fijaban a los semiarcos mediante barras de pretensado.

En la construcción de los semiarcos del puente 1, que se hizo mediante un encofrado trepador, se plantearon dos dificultades:

La primera dificultad consistió en que el arco cambia de sección en la zona solidaria con el tablero, y ello obligó a cimbrar la zona donde se produce el cambio de sección, sobre el tablero ya construido a los lados del arco.

La segunda dificultad fue debida a unos cables de alta tensión que obligaron a construir uno de los semiarcos volcado hacia el río, lo que complicó su construcción, especialmente por el desplome que se producía en las últimas fases de trepado. Fue necesario fijar el arco mediante bielas metálicas al tablero del vano lateral durante la construcción, para resistir el par de vuelco debido al desplome; y también fue necesario hacer el hormigonado de las últimas fases del semiarco con una tensión inicial en el tirante de abatimiento, para reducir la flexión en el semiarco.





Para la operación de girado de los semiarcos se requieren articulaciones en los arranques que permitan efectuar el giro, y posteriormente una articulación en clave que permita completar el arco triarticulado inicial. En el proyecto de las articulaciones provisionales ha sido necesario tener en cuenta varios problemas:

En primer lugar, la estabilidad durante la operación de girado. Esto nos llevó a disponer dos articulaciones por semianillo, hechas con orejetas completas, unidas por un bulón sobre el que se efectuaba el giro. Las orejetas completas aseguran la estabilidad transversal al viento durante el girado, porque pueden resistir tracciones en la articulación.

En segundo lugar, deben permitir correcciones en planta y en alzado de la posición de los semiarcos una vez girados, para asegurar que la directriz final es la correcta. Esto se consigue colocando unos gatos horizontales entre las articulaciones de arranques y las cimentaciones del arco. Las articulaciones se apoyan sobre teflón para que se puedan mover. La posible tracción que pueda aparecer en ellas por efecto del viento transversal se



resiste mediante pestañas fijadas a la cimentación, que sujetan la base de las articulaciones y permiten su movimiento.

Además de los gatos traseros, que resisten las fuerzas horizontales que transmiten las articulaciones a



la cimentación, inicialmente son necesarios unos topes delanteros horizontales para resistir las fuerzas que transmiten las articulaciones en la primera fase del girado, porque como



hemos dicho, los semiarcos se construyen con su centro de gravedad situado en el lado del

trasdós de las articulaciones y por tanto la fuerza horizontal en ellas es de signo contrario que la del arco cerrado. Estos topes se quedan sin carga cuando, durante el abatimiento, el centro de gravedad

del semianillo pasa al otro lado de las articulaciones; la carga pasa entonces a los gatos traseros.

Los gatos traseros sirven también para recuperar las piezas que forman las articulaciones provisionales, una vez que se hormigona la primera fase del bloqueo de estas articulaciones. En ese momento se quita la carga de los gatos y se pueden retirar todas las piezas.

Las articulaciones de clave son análogas a las de los arranques. Necesitan movimiento en todas direcciones para poder fijar los bulones; y necesitan también gatos en uno de los lados, para poder dejar sin carga las articulaciones una vez hormigonada la primera fase del bloqueo de la articulación, y retirar las piezas que formaban ésta.



Una vez terminados los semiarcos, se soltaron los contrafuertes de hormigón y se inició el giro. Como hemos visto, los semiarcos, en su posición inicial, estaban volcados hacia el exterior del arco, salvo el que se construyó más avanzado a causa de los cables de alta tensión. Por ello, para

iniciar el giro, es necesario empujar el arco mediante gatos que se fijan en un extremo al tablero ya construido, y en el otro a los arcos. Mediante estos gatos se fueron moviendo los semiarcos, hasta que la vertical de su centro de gravedad quedó dentro del vano del arco, lo que les permite girar por su propio peso, retenidos por el tirante. Desde ese momento la operación consistió en ir soltando los tirantes de retenida mediante gatos de doble efecto,

hasta que las orejetas de los semiarcos coincidieran en la clave, para poder pasar el bulón de enlace.



Los tirantes de retenida se fijaron en un extremo a unos bípodes sobre los que actuaban los gatos de doble efecto que van soltando los tirantes, y en el otro extremo se fijaron a unos puntos intermedios de los semiarcos. Los bípodes se situaron fuera del arco y se fijaron al terreno

mediante una cimentación delantera de micropilotes y trasera de anclajes activos al terreno. En la margen derecha del puente 1, donde se encuentra el viaducto de acceso, los bípodes se situaron sobre éste, anclándolos al tablero. Esto planteó un problema para resistir las fuerzas horizontales que transmitían los bípodes, porque, como hemos visto, el viaducto de acceso está apoyado sobre neoprenos. Esto obligó a introducir unas tornapuntas inclinadas provisionales desde el extremo superior de la última pila en V del viaducto de acceso, a la cimentación del arco, para transmitir a la cimentación del arco las fuerzas horizontales que los bípodes introducían en el tablero del viaducto.

El giro de los dos anillos de cada margen se hizo simultáneamente, salvo el que estaba más adelantado, que esperó a su compañero. Una vez terminado el abatimiento fue necesario corregir la posición en planta de los semiarcos, desplazando las articulaciones con los gatos horizontales, hasta dejar los semiarcos alineados.

Colocados los semiarcos en su posición definitiva, se fijaron las articulaciones de clave, dejando los arcos triarticulados.

El bloqueo de las articulaciones de clave y arranques se hacía en dos fases. Primero se hormigonaba la zona comprendida entre las dos articulaciones provisionales; luego se retiraban éstas, y se completaba el hormigonado. En la clave, a la vez que se hormigonaba la primera fase, se hormigonaba una zona de unión de la losa entre cajones para asegurar la estabilidad transversal del conjunto.



Una vez empotrados los arcos en clave y arranques se completó el

tablero mediante una cimbra apoyada en los arcos, hasta terminar los puentes.