

Diseño y construcción del puente Frank Gehry. Primer acceso a la nueva isla de Zorrotzaurre en Bilbao

Design and construction of Frank Gehry Bridge. First access to the new Island of Zorrotzaurre in Bilbao

Pablo Alfonso Domínguez^{a,*}, Guillermo Capellán Miguel^b, Héctor Beade Pereda^c,
Marianela García Pérez^a, Alejandro Godoy Ansótegui^a, Jorge López Tamames^d
y Víctor José García Martín^e

^a Ingeniero de C. C. y P., Arenas & Asociados, Jefe de Proyectos, Santander, España

^b Dr. Ingeniero de C. C. y P., Arenas & Asociados, Director Técnico, Santander, España

^c Ingeniero de C. C. y P., Arenas & Asociados, Coordinador de Proyectos, Santander, España

^d Ingeniero de C. C. y P., Teknés Innovación, Director Técnico, Barakaldo, Vizcaya, España

^e Ingeniero de C. C. y P., Teknés Innovación. Gerente, Barakaldo, Vizcaya, España

Recibido el 31 de marzo de 2017; aceptado el 28 de abril de 2017

Disponible en Internet el 16 de junio de 2017

Resumen

Nombrado Frank Gehry como homenaje del Ayuntamiento de Bilbao, este puente materializa la primera conexión de la futura isla de Zorrotzaurre con el resto de la trama urbana, salvando el curso de agua mediante un vano principal de 76,9 m y una anchura media de 28 m. Es un puente de especial interés por su sistema estructural, que combina un esquema de viga Fink invertida con una viga de tres vanos con canto variable, sin precedentes en puentes para tráfico rodado.

La construcción del puente se realiza sobre tierra firme, contando durante la puesta en carga con instrumentación en tiempo real de todos los elementos con acceso remoto por Internet.

© 2017 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Puente urbano; Viga Fink invertida; Cable cerrado; Instrumentación

Abstract

Named after Frank Gehry as homage by Bilbao's City Council, the bridge will materialize the first connection of this island with the rest of the urban fabric. It saves the watercourse with a main span of 76.9 m and an average width of 28 m, using an innovative design concept which combines two structural schemes: an inverted Fink Truss and a three span variable height beam. It is a bridge of major interest due to the structural type used, without any precedent in road bridges.

The bridge construction is carried out on land, counting on real time monitoring of all structural elements during bridge cables tensioning, with Internet remote access.

© 2017 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Urban bridge; Inverted Fink truss; Full locked cables; Bridge monitoring

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: palfonso@arenasing.com (P. Alfonso Domínguez).

1. Contexto histórico y antecedentes

Gracias a las intervenciones llevadas a cabo en la ciudad durante los últimos veinte años, Bilbao ha pasado de ser una dura urbe industrial a convertirse en un lugar atractivo para vivir y un destino turístico de primer orden. Un ejemplo de exitosa transformación urbana admirado e imitado a escala mundial. La ría del Nervión, en tiempos infraestructura para acceso de embarcaciones al centro de la ciudad, ha recuperado sus márgenes para el ocio ciudadano.

Esta transformación prosigue hoy en día y estará focalizada durante las próximas dos décadas en la península (artificial) de Zorrotzaurre. La característica forma de esta zona es el resultado de un ambicioso proyecto llevado a cabo a mediados del siglo pasado: la apertura de un canal artificial para evitar un meandro del río y facilitar la navegación de embarcaciones mayores en su trayecto desde el mar hasta el centro de la ciudad (figs. 1-2). Este desarrollo nunca se llegó a completar.

El Plan General de Ordenación Urbana de Bilbao, de 1996, incluía un cambio de uso para el área de Zorrotzaurre de industrial a residencial. El nuevo Plan Especial para la regeneración urbana de la zona (basado en un Master Plan redactado por el estudio de la arquitecta Zaha Hadid), de 2011, incluye, a fin de mejorar la protección de la ciudad ante avenidas, la apertura completa del Canal de Deusto, con la consiguiente transformación de la península en isla. De este modo, son necesarios también una serie de puentes sobre el canal y la ría del Nervión para garantizar la accesibilidad a la futura isla.

En mayo de 2011 Euskal Trenbide Sarea convoca el concurso para la redacción del proyecto del primero de los puentes de acceso a la futura isla (en prolongación de la calle Julio Urquijo en Deusto, fig. 3), del que Arenas & Asociados resultó vencedor en UTE con CV Ingeniería. Las obras del puente, junto con la apertura del canal, se adjudicaron a la UTE Canal de Deusto (Exbasa - Balzola - Vda. de Sainz - Urssa), habiéndose finalizado ya la construcción del puente.

2. Concepción y diseño del puente

2.1. Concepción del puente

Asumiendo la gran responsabilidad que supone proyectar un puente en una ciudad como Bilbao (especialmente si este cruza su ría), a la hora de concebir el acceso a la isla de Zorrotzaurre se estableció el ambicioso objetivo de llegar a un diseño que fuese, al mismo tiempo, singular, atractivo y elegante; transparente, urbano y funcional; compatible con el régimen de avenidas del Nervión; único por su integración el lugar, íntimamente relacionado con el entorno en el que se localiza y su historia, así como la del resto de puentes que cruzan la ría; representativo del estado del arte en la tecnología de puentes; sostenible y durable. Y todo ello desde la honradez estructural, sin renunciar a un esquema resistente con una eficiencia que permitiese alcanzar este ambicioso conjunto de autoexigencias de diseño desde una inversión económica razonable [1].

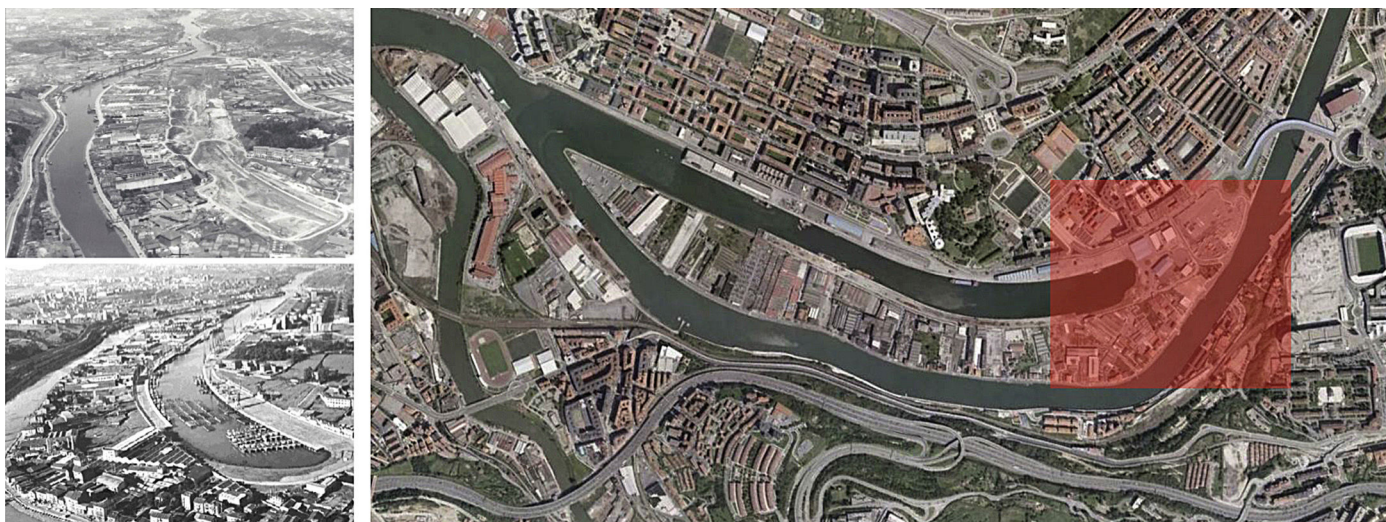
2.1.1. Integración urbana, funcionalidad

El puente se planteó, en la medida de lo posible, como una calle (especial) del nuevo espacio urbano. En este sentido se buscó un trazado en alzado suave, estableciendo que no existiese en ningún momento pérdida de visibilidad por parte de los vehículos que cruzan el puente. La pendiente máxima (3%) asegura asimismo su plena accesibilidad. A los dos carriles por sentido de circulación se añadió una acera de 5 m a cada lado, una de tráfico exclusivamente peatonal y la otra de tráfico compartido peatonal-ciclista.

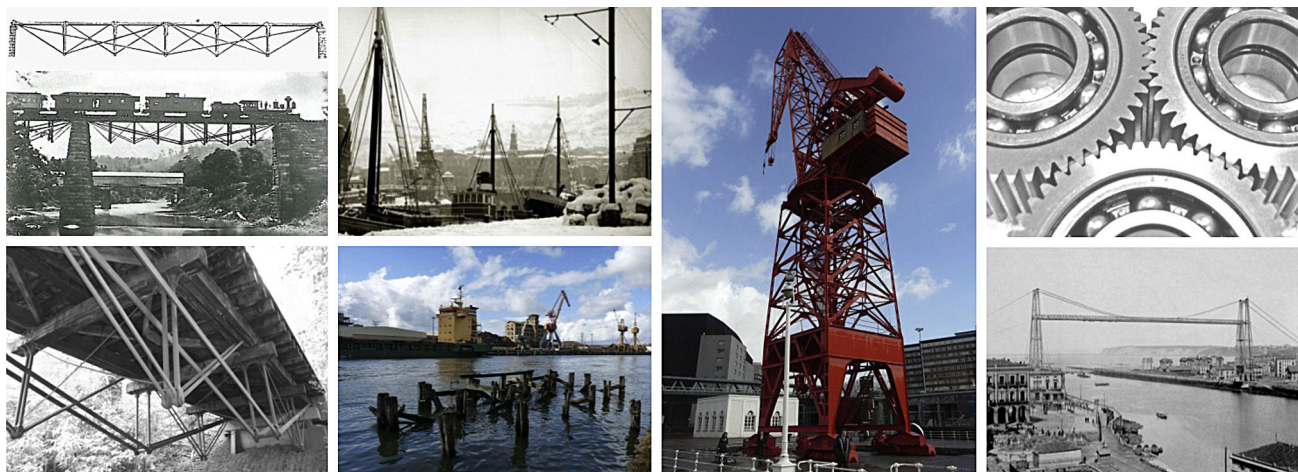
Un requerimiento que fu a su vez un condicionante significativo para su diseño era la necesidad de alojar en su tablero distintas conducciones de servicios.

2.1.2. Compatibilidad con el régimen de avenidas del Nervión

El puente debe ser compatible con el régimen de avenidas del Nervión, para lo que debía tener una longitud mínima de 75 m (la



Figuras 1-3. . Figura 1 (superior izquierda). Vista aérea de Zorrotzaurre en 1960, trabajos de apertura del canal. Figura 2 (inferior izquierda). Vista aérea en 1969. Figura 3 (derecha). Planta de localización del puente Frank Ghery.



Figuras 4-10. Figuras 4 y 5 (columna izquierda). Viga Fink clásica. Figuras 6 a 8 (columnas centrales). Pasado y presente portuario industrial de la ría y península de Zorrotzaurre. Mástiles y grúas. Figuras 9 y 10 (columna derecha). Otras referencias del diseño: engranajes industriales y Puente Colgante de Bizkaia.

anchura del canal) y la cara inferior debía situarse por encima de la cota +4,45 m, garantizándose un resguardo adicional de 1,00 m en los 40 m centrales del canal.

2.1.3. Requerimientos estructurales y transparencia

Desde el punto de vista estructural, se planteó el cruce del canal sin apoyos intermedios. El máximo canto de tablero bajo rasante disponible varía entre 1,00 m en los desembarcos y 1,41 m en el centro (1/55 de la luz). Estos valores resultan del todo insuficientes para permitir salvar la distancia sin disponer parte de la estructura por encima del tablero.

En relación a la transparencia, se buscó evitar en la medida de lo posible la creación de una pantalla y, sin renunciar a la singularidad, huir de la creación de un hito paisajístico que pudiese entrar en un posible conflicto de símbolos con el cercano puente Euskalduna y con los propios edificios singulares que formarán parte del desarrollo urbanístico de la isla.

2.1.4. Coherencia con el contexto espacial

Se pretendió crear un puente relacionado, desde su concepción y de manera íntima, con el entorno en el que se localiza y su historia. Un puente cuyo diseño se descontextualizaría en otro lugar. Un puente que es de Bilbao y de Zorrotzaurre y que pierde sentido en otras ubicaciones.

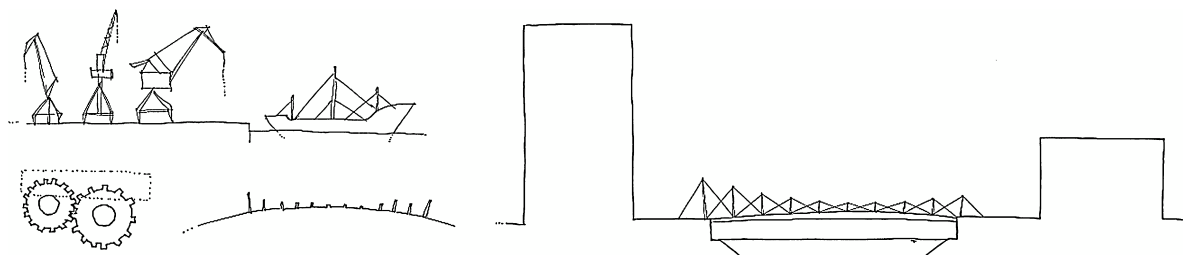
En busca de este objetivo, y con los requerimientos estructurales y de transparencia indicados, se planteó una solución atípica: una variante invertida de la viga tipo Fink clásica (esquema en el que la estructura principal se dispone bajo el tablero, [figs. 4 y 5](#)).

La estructura proyectada incorpora, a esta inusual configuración, una viga en vientre de pez invertida de canto reducido.

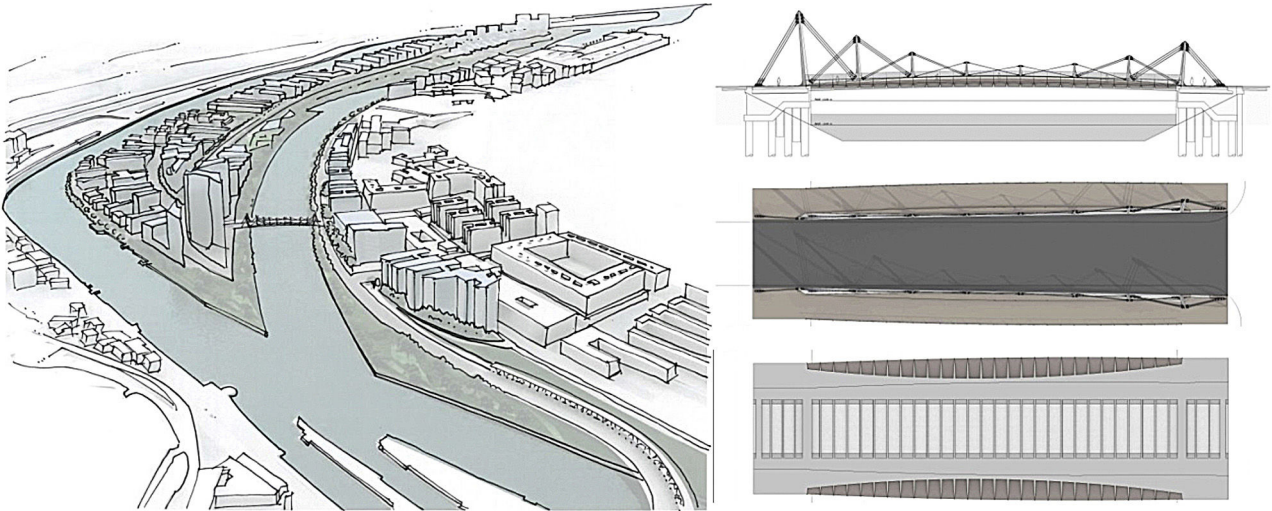
El puente así planteado sintetiza una parte importante de la historia de Bilbao y su ría y, más concretamente, de la península de Zorrotzaurre y el canal de Deusto, al evocar con su diseño el pasado portuario e industrial de la zona. La imagen de la sucesión de mástiles de la estructura recuerda la sucesión de grúas que ha habido y sigue habiendo en las márgenes de la ría del Nervión, a la sucesión de mástiles y chimeneas de los barcos que atracaban y atracan en las instalaciones portuarias de la ría y el canal, y a las chimeneas de las propias industrias que se ubicaban y ubican a los márgenes de la ría ([figs. 6 a 8 y 11](#)) [2].

La distribución de mástiles del esquema propuesto, radial según la curvatura de la cara superior de las vigas en vientre de pez a modo de engranaje, ayuda también a evocar el pasado de la zona ([figs. 9 y 11](#)). Asimismo, la imagen del puente, la tecnología empleada en él y el mecanismo resistente de viga ayudada sirven de homenaje al relativamente próximo Puente Colgante de Bizkaia, Patrimonio de la Humanidad ([fig. 10](#)) [3].

El diseño propuesto, como lo fue el de muchos del resto de los puentes de Bilbao en el momento de su construcción, es representativo del estado del arte en la tecnología de puentes. La solución es altamente tecnológica y muy singular, prácticamente única, al no haber precedentes en el uso de una tipología como esta en un puente de carretera. Este puente estará en la vanguardia tecnológica, característica que ha definido a la ciudad de Bilbao a lo largo de los años.



Figuras 11 y 12. Figura 11 (izquierda). Contexto portuario industrial, engranajes y alineación radial de mástiles. Figura 12 (derecha). Esquema preliminar del puente diseñado.



Figuras 13 y 14. Figura 13 (izquierda). Croquis en el que se refleja la integración de la solución en la futura isla de Zorrotzaurre. Figura 14 (derecha). Alzado, planta y planta espejo del puente.

En cuanto a los materiales a emplear en su construcción, se planteó el uso de acero como material principal, lo que entronca conceptualmente con la tradición siderúrgica de la ciudad y la ría, así como con otras importantes actuaciones que se han venido realizando en las riberas en tiempos recientes, también proyectadas en distintos tipos de acero.

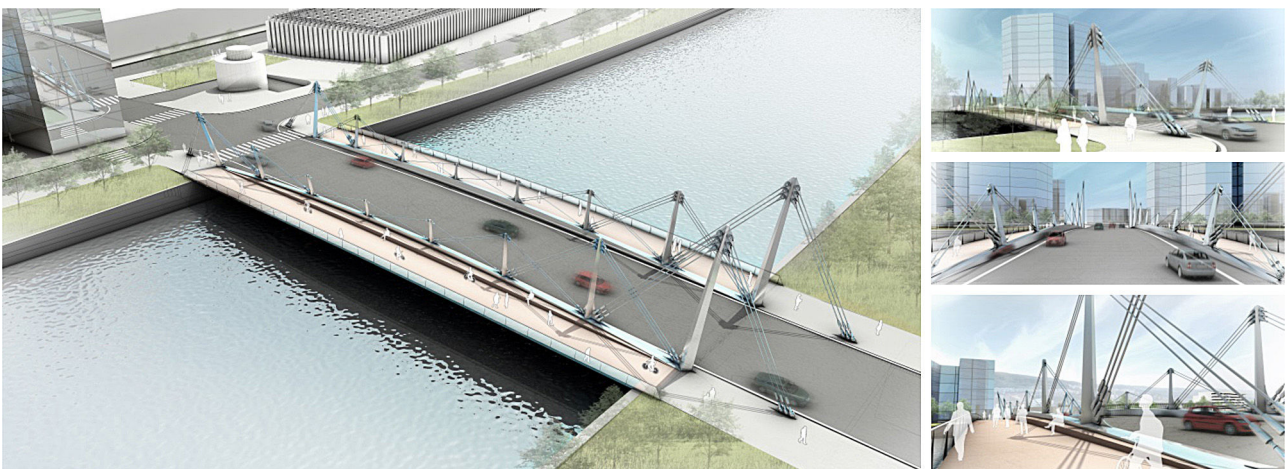
2.2. El puente diseñado

El puente permite salvar los 75 m de anchura del canal de Deusto con un esquema estructural innovador y que supone una reducida presencia visual sobre el tablero (figs. 13 y 14). Se emplean dos vigas tipo Fink invertidas como estructura principal, con mástiles de altura variable y un cordón inferior en vientre de pez, de canto y ancho estructural también variables. Estas vigas, situadas entre la calzada y las zonas de acera + carril bici, sirven, además de elemento estructural principal del puente, como separación de tráfico y lugar de descanso (incorporan un banco en la propia estructura del cordón inferior), confiriendo una sensación psicológica de protección y seguridad a los peatones y ciclistas, y permitiéndoles disfrutar de las vistas al canal. La

distribución de luces de los cordones inferiores de las vigas Fink invertidas y, por extensión, del puente es de $10,0 + 76,9 + 8,7$ m.

El alzado del esquema Fink invertido es asimétrico para adecuarse a la disponibilidad de espacio, en cada una de las márgenes, para los cables de retenida de los mástiles extremos. De este modo, el mayor de ellos tiene una altura de 15 m sobre el tablero, su opuesto de 9 m y el menor de todos de 2 m (fig. 14). La sección de estos mástiles es cuadrada y variable, de dimensiones máximas en sus arranques (figs. 15-18).

Los cordones inferiores en vientre de pez, ubicados parcialmente bajo la rasante, tienen una sección transversal poligonal irregular, con canto y ancho variables simétricamente respecto al centro del canal (Fig. 14). Su canto es de 1,0 m en la sección de apoyo en los bordes del canal y de 2,35 m en el centro del puente, sobresaliendo 1,2 m por encima del pavimento de aceras (Figs. 15 y 18). Su anchura varía entre 7,30 m en la sección de apoyos y 4,45 m en centro luz. Esta variación de canto y anchura permite adaptar adecuadamente las inercias del tablero a la ley de momentos flectores de una viga de tres vanos, compatibilizando una adecuada funcionalidad con un funcionamiento estructural eficiente.



Figuras 15-18. Imágenes virtuales del puente diseñado en fase de proyecto.

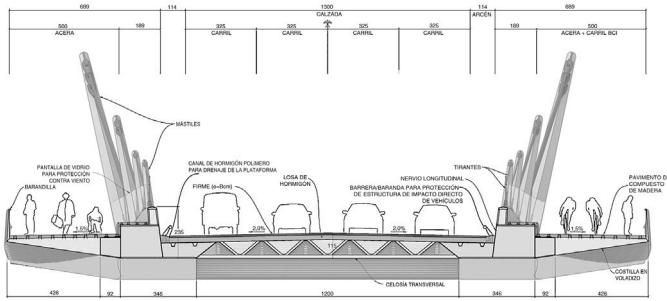


Figura 19. Sección transversal del puente en centro luz. Vista hacia la margen de Deusto.

La sección transversal del tablero tiene una anchura variable entre 26,8 m y 29,0 m, en los que se alojan entre 14,0 y 17,0 m de anchura de plataforma (la anchura de arcén es variable), 5,0 m por lado de aceras, y las bandas para ubicación de elementos estructurales. La variabilidad en la anchura del puente tiene como objetivo lograr la mejor adecuación posible al nudo viario que se forma en el desembarco en la margen de Deusto (figs. 15 y 17).

En cuanto a materiales, la estructura metálica de tablero y mástiles está constituida por acero al carbono de calidad S355 NL salvo en el caso excepcional de las orejetas de anclaje de tirantes y otras zonas especiales, en las que se ha utilizado acero de calidad S460 NL. Los tirantes que vinculan los mástiles a los nervios longitudinales de tablero son de cable cerrado de acero de alta resistencia, con anclaje superior pasivo en horquilla e inferior activo en horquilla con tensor. Para evitar que estos tirantes coincidan en un mismo plano, los mástiles se van inclinando progresivamente desde la margen de Zorrotzaurre hasta la de Deusto (figs. 17, 19 y 20).

Los nervios principales de tablero se vinculan entre sí mediante diafragmas en celosía tipo Warren, ubicados bajo la rasante, que permiten alojar las conducciones que cruzan el canal a través del puente (fig. 19). El pavimento de las aceras es una tarima de compuesto de madera sobre vigas de madera laminada

que se apoyan en la estructura metálica (en los nervios longitudinales o en costillas metálicas con sección triangular que parten de ellos). Este tipo de pavimento (figs. 19 y 20) aporta la calidez de la madera, gran durabilidad y baja resbaladilidad.

Los estribos cumplen funciones adicionales a las que habitualmente se requieren. Alojan una parte de los sistemas de anclaje de la reacción vertical que se genera en los extremos de los vanos laterales, un gran contrapeso para compensar esta reacción vertical y una gran arqueta visitable para inspección y mantenimiento de estos sistemas de anclaje, los aparatos de apoyo, la estructura metálica y las conducciones que cruzan el canal a través del puente (fig. 20).

Para adaptarse a la solución de contención del proyecto de apertura del Canal de Deusto se ha planteado una cimentación sobre una pantalla perimetral de pilotes de 1,5 m de diámetro y, en el borde trasero, una alineación de pilotes del mismo diámetro más separados en el caso del estribo de la margen de Zorrotzaurre, y una pantalla pilotes de casi tangentes de 1,0 m de diámetro (para evitar interrupciones del tráfico durante la ejecución de las obras), en el caso del estribo de la margen de Deusto.

Se ha buscado un sistema de alumbrado que se integre en la medida de lo posible en la estructura para provocar una mínima interferencia visual y dificultar que se vea afectado por actos vandálicos. Todas las luminarias propuestas son tipo LED. La iluminación funcional de la calzada se realiza desde los mástiles y la de las zonas peatonales desde las barandillas y desde los bancos situados al pie de los mástiles, por medio de luminarias lineales. Se han planteado también iluminaciones ornamentales de los mástiles con proyectores y de la cara inferior del tablero, por reflexión en la lámina de agua del canal, con luminarias lineales.

2.3. Comportamiento y análisis estructural

El comportamiento estructural del puente responde a la suma de dos esquemas claramente diferenciados. En el caso del esquema principal, la viga Fink invertida funciona como una sucesión de atirantamientos en la que los mástiles, salvo en los extremos, no están sustentados en un punto fijo. Cuanto más deformable resulta el punto de apoyo del mástil, menos eficaz es su atirantamiento. Por esta razón, los mástiles van perdiendo eficacia según se aproximan a centro luz (de ahí el descenso de su altura), y el correcto tesado de los tirantes resulta un aspecto fundamental para alcanzar la eficiencia del esquema. Para compensar la pérdida de eficacia del esquema anterior según se avanza de apoyos a centro luz, se le ha sumado la viga en vientre de pez invertido descrita anteriormente.

Para el dimensionamiento y la verificación de los distintos elementos de la estructura se ha empleado, como modelo de cálculo principal, un modelo de elementos finitos (EF) tipo barra (figs. 21 y 22) en el que los cables se han modelizado como tales, con sus cargas de tesado correspondientes, y la losa de tablero con un emparrillado bicapa. Para tener en cuenta los efectos de segundo orden se ha realizado un análisis no lineal, habiendo introducido en el modelo las imperfecciones geométricas equivalentes afines a la deformada de pandeo. Con este modelo se

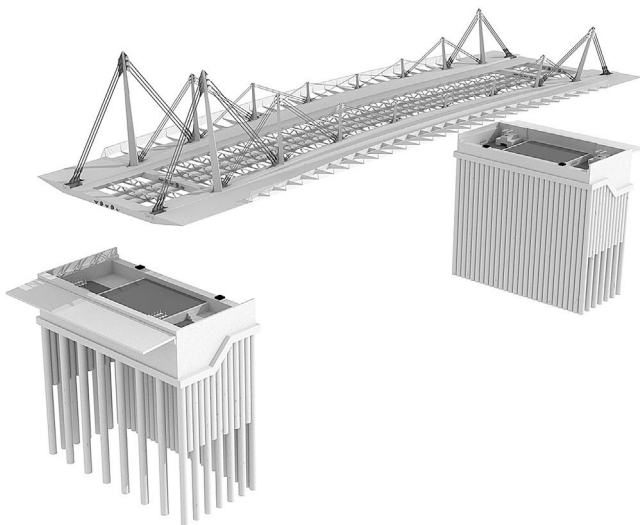
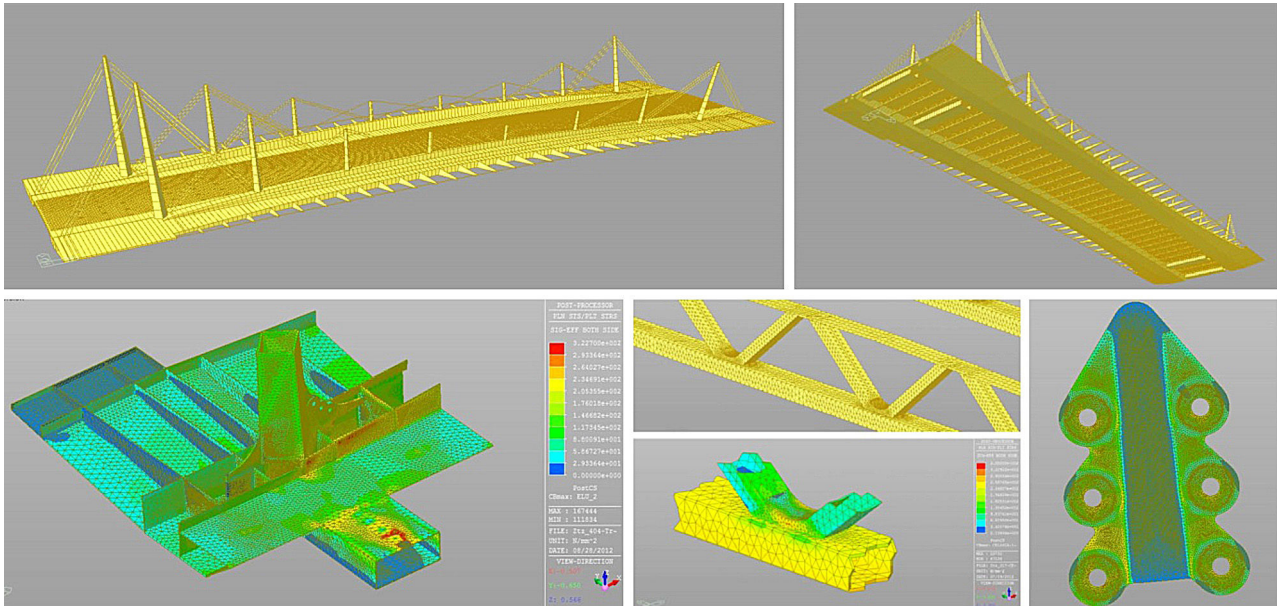


Figura 20. Imagen virtual en la que se muestra la estructura metálica y las cimentaciones del puente.



Figuras 21-26. Modelos de cálculo (de izquierda a derecha y de arriba abajo). Figuras 21 y 22. Modelo general. Figura 23. Modelo de detalle de EF tipo lámina de uno de los nudos de la estructura. Figuras 24 y 25. Celosías modelizadas mediante EF tipo lámina integradas en el modelo general. Figura 26. Uno de los modelos de EF tipo lámina para el diseño y análisis de las orejetas de anclaje de los tirantes.

han realizado la mayor parte de comprobaciones seccionales en ELU y en ELS.

Los distintos tipos de nudos de la estructura metálica del tablero, incluyendo los de las celosías transversales, se han analizado, tanto en primer como segundo orden, por medio de modelos de EF tipo lámina incorporados al modelo general (reemplazando a los elementos tipo barra correspondientes, figs. 23 a 25). También se han analizado por medio de EF tipo lámina las orejetas de vinculación tirante-estructura (fig. 26).

La adecuada comprobación de la respuesta dinámica de la estructura es un aspecto importante en un puente esbelto y de tipología singular como el que nos ocupa, que prevé tener un tráfico peatonal intenso y cuenta con voladizos laterales transitables esbeltos. Por este motivo se ha realizado un estudio de vibraciones avanzado, con el que se han analizado tanto las vibraciones inducidas por el tráfico peatonal (incluso considerando la calzada ocupada por peatones) como las inducidas por el paso de vehículos pesados a distintas velocidades sobre la plataforma. Se ha comprobado que, en ambos casos, las aceleraciones producidas se encuentran dentro de los rangos de confort para los usuarios admisibles (según lo recogido en IAP-11, EUR 23984 EN, etc.).

3. Construcción del puente

La construcción se ha llevado a cabo en seco, ya que la apertura del Canal de Deusto se completará una vez que el puente se ha ejecutado y está en servicio. En el caso de esta tipología este hecho resulta determinante, ya que no permite su construcción por avance en voladizo desde sus mástiles extremos, siendo el empleo de apoyos provisionales intermedios indispensable [4].

3.1. Estribos y apoyos provisionales

La construcción de los estribos comenzó con una excavación a cielo abierto (fig. 27), tras la que se ejecutaron los pilotes de cimentación de 1,50 m de diámetro (26 en el estribo 1 y 23 en el estribo 2), con una longitud de aproximadamente 20 m. Durante estos trabajos fue necesario un bombeo continuo por encontrarse bajo el nivel freático. Posteriormente se ejecutó la estructura de hormigón armado de los estribos, incluyendo la disposición de las orejetas de anclaje de las bielas de retenida.

Dado que el contrapeso no era necesario hasta la puesta en carga de la estructura del puente y que interfería con las conducciones, el relleno de hormigón en masa se realizó posteriormente, cuando ya se había avanzado en la ejecución de la estructura metálica (fig. 28).

Los apoyos provisionales (figs. 29 y 30) estaban formados por un apeo metálico sobre encepado de 4 pilotes hincados de hormigón armado. Estos apoyos se diseñaron para soportar una reacción máxima de 2.000 kN, con una doble función: servir



Figura 27. Vista interior del estribo 2.



Figura 28. Hormigonado de contrapeso.

como apoyo de la estructura metálica durante su montaje en obra y alojar el gato utilizado durante la puesta en carga y desapeo final de la estructura completa.

3.2. Estructura metálica

La estructura metálica se fabricó en taller en piezas (fig. 31). Se fabricaron los cajones longitudinales en tramos de aproximadamente 11 m de longitud, cada una de las celosías y riostras transversales, los 16 mástiles y las costillas en voladizo de aceras con el montante de barandilla correspondiente. Todas las piezas se colocaron en su posición mediante grúas de gran tonelaje (fig. 32).

Siendo un puente urbano y estando parte de la estructura metálica a la vista y muy cercana a los usuarios del puente, se puso especial cuidado en el acabado de las uniones de estas zonas, siendo todas ellas soldaduras esmeriladas. Se estudió especialmente la ejecución de los mástiles, optando por soldar en taller sus cuatro aristas y mecanizarlas posteriormente en la pieza completa, obteniendo así el acuerdo circular definido en proyecto. Dada la complejidad de este procedimiento y su influencia en el acabado final, se decidió hacer un ensayo a escala real con un resultado completamente satisfactorio (figs. 33 y 34). Posteriormente se comprobó en obra que el resultado final en todos los mástiles era el buscado (fig. 35).

Las bielas de retenida (fig. 36) se montaron una vez dispuestos los tramos extremos de los cajones metálicos. Estas bielas transmiten la carga de retenida al contrapeso mediante una orejeta inferior anclada al estribo con 14 barras pretensadas $\varnothing 50$.

Las costillas metálicas de los voladizos de aceras y su prolongación vertical en el montante de la barandilla, de sección triangular, se fabricaron en taller mediante chapa plegada formando la arista vista (figs. 37-39). Así se permitía eliminar esa soldadura, evitando posibles deformaciones durante su ejecución y obteniéndose un excelente resultado estético en el montante de la barandilla.

3.3. Tirantes

El puente consta de 64 tirantes de cable cerrado con terminal pasivo superior y activo inferior, de diámetros comprendidos entre 50 y 90 mm. Se transportaron desde las instalaciones de



Figuras 29 y 30. Apoyo provisional, previamente a colocar la estructura y con el gato de apeo.



Figuras 31 y 32. Fabricación en taller e instalación de piezas metálicas en obra.



Figuras 33 y 34. Ensayo de soldadura y mecanizado posterior de la unión en arista del mástil.



Figuras 35 y 36. Figura 35 (izquierda). Vista de mástiles acopiados en obra. Figura 36 (derecha). Bielas de retenida.

Pfeifer, en Alemania, a obra embalados de forma diferente en función de la longitud de estos (figs. 40 y 41). Los terminales activos (figs. 42 y 43) se completaron en obra.

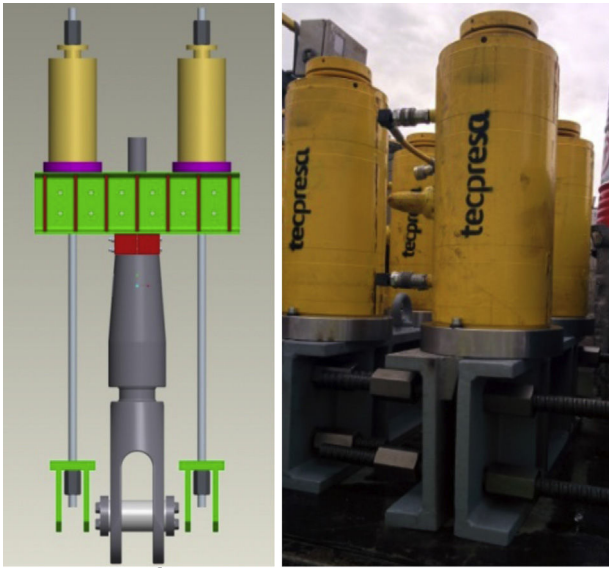
La instalación de los tirantes se realizó una vez que se había completado la estructura metálica de tablero y mástiles, izándolos mediante dos grúas. En esta operación era importante el desenrollado de los tirantes de mayor longitud, para evitar que estos pudieran «deshilarse», lo que hubiera provocado importantes retrasos.



Figuras 37-39. Vistas de una costilla con montante vertical y detalle de chapa plegada.



Figuras 40-43. Tirantes de cable cerrado acopiados en obra y elementos de terminales activos de los tirantes.



Figuras 44 y 45. Útil de tesado, render previo (infografía: Tecpresa) y útil fabricado.



Figuras 46 y 47. Orejetas provisionales.

3.4. Procedimiento de tesado y puesta en carga

3.4.1. Trabajos previos

Para llevar a cabo el tesado de los tirantes del puente, Tecpresa (empresa encargada de las operaciones de tesado y puesta en carga) diseñó y fabricó previamente los útiles de tesado (figs. 44 y 45). Estos útiles estaban formados por dos barras roscadas de acero de alta resistencia, terminales de fijación a las orejetas provisionales, gatos de tesado y perfiles de apoyo de los gatos sobre el terminal. Eran regulables para ajustarse a los diferentes diámetros de tirante y separaciones entre orejetas provisionales. Fueron necesarios 4 útiles, para permitir el tesado de 2 parejas de tirantes al mismo tiempo.

Asimismo, se diseñaron y fabricaron orejetas provisionales (figs. 46 y 47) situadas a ambos lados de todas las orejetas inferiores, para anclar los útiles de tesado y transmitir la carga a la estructura. Estas orejetas, soldadas a los cajones longitudinales, fueron eliminadas una vez que finalizó el proceso de tesado (fig. 48).

3.4.2. Procedimiento

El procedimiento de tesado diseñado constaba de 19 fases en las que se actuaba tesando tirantes o sobre los gatos de apeo. La premisa principal era alcanzar la carga objetivo en cada tirante realizando el menor número de operaciones de tesado. Durante el proceso se impuso la condición de no sobrepasar la carga admisible de los apoyos provisionales y que no se produjeran despegues, así se conseguía que el tesado de las dos parejas de tirantes de una fase no afectase a la carga de los tirantes restantes. De esta forma únicamente fue necesario realizar dos pasadas de tesado sobre 6 de las 16 parejas de tirantes (y sus simétricos). El procedimiento se pudo llevar a cabo gracias a contar con instrumentación en tiempo real, con acceso remoto vía Internet (fig. 49).



Figura 48. Tesado de pareja de tirantes.

En cada fase se actuaba siempre sobre la pareja de tirantes de un mismo mástil y su simétrica respecto al eje del tablero. Así se introducían cargas centradas en dicho mástil y las solicitaciones provocadas en ambos cajones longitudinales eran simétricas, evitándose posibles esfuerzos adicionales en las celosías transversales.

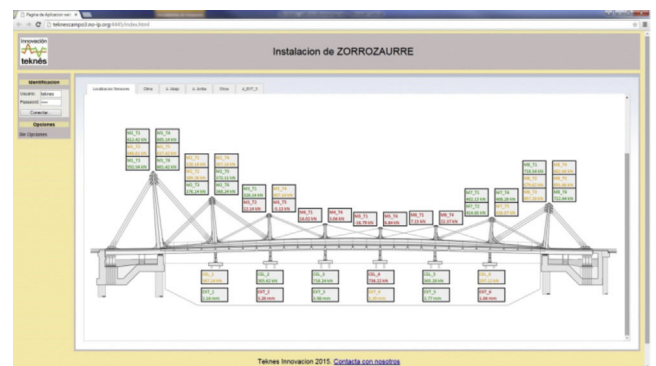


Figura 49. Aplicación para acceso remoto a instrumentación durante el procedimiento de tesado y puesta en carga.



Figura 50. Hormigonado de la losa.

3.5. Losa de hormigón armado

La losa de hormigón de la zona de plataforma de calzada entre planos de tirantes se ejecutó sobre un encofrado dispuesto entre celosías y riostras transversales, para evitar que el peso del hormigón fresco actuase sobre las celosías previamente al endurecimiento de la propia losa, que actúa como cordón superior de estas (fig. 50).

Este procedimiento es posible ya que el puente se construye en seco, pudiéndose cimbrar el encofrado mediante puntales directamente sobre el terreno.

3.6. Acabados

Los acabados incluyen la capa final de pintura de la estructura metálica, el firme de la calzada, la estructura de madera laminada y pavimento en aceras, barandillas, pantallas anti-viento e iluminación (figs. 51-53).

Tabla 1
Canales de instrumentación

Medición	Canales
Fuerza en los cables	64
Fuerza en las bielas de retenida	24
Carga en apeos	12
Desplazamientos en apeos	12
Desplazamientos en apoyos	4
Útil de tesado	8

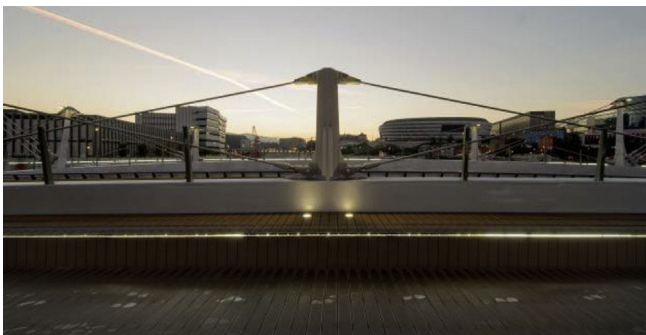


Figura 54. Galga extensiométrica en tirante.

4. Instrumentación

Teknés Innovación monitorizó la construcción del puente en tiempo real, mediante la implementación de un complejo sistema de 232 canales (tabla 1).

Se colocó una galga extensiométrica, más una de reserva, en cada uno de los cables. También se instrumentaron los útiles de tesado, lo que permitió comprobar las galgas de los cables aprovechando las operaciones de tesado (figs. 54 y 55).



Figuras 51-53. Vistas del puente terminado (Fotos: Carlos Garmendia).



Figura 55. Instrumentación de apeos.

Se controlaron además las cargas en las bielas de retenida, así como los aparatos de apoyo esféricos, para evitar que, debido a un sobre-tesado de los tirantes, se produjeran despegues en los mismos.

Todo esto se completó con 12 células de carga, una en cada apeo provisional, que permitían tener un control continuo del reparto de cargas durante toda la operación de tesado. Todos los datos eran accesibles en tiempo real a través de Internet.

5. Prueba de carga

Una vez finalizado el puente, se realizaron las preceptivas pruebas de carga estáticas y dinámicas.

La prueba de carga estática (figs. 56-57) se realizó en 4 hipótesis y se emplearon un total de 20 camiones de 38 toneladas cada uno. Las aceras se cargaron con palets de baldosas. El control de los desplazamientos se realizó con 17 extensómetros que permitían tener un control en tiempo real del comportamiento de la estructura.

La prueba de carga dinámica se realizó con un camión de 38 toneladas pasando a velocidades de 5, 20 y 30 km/h, por distintos carriles, con y sin tablón RILEM. Se midieron aceleraciones en



Figura 56. Prueba de carga estática.

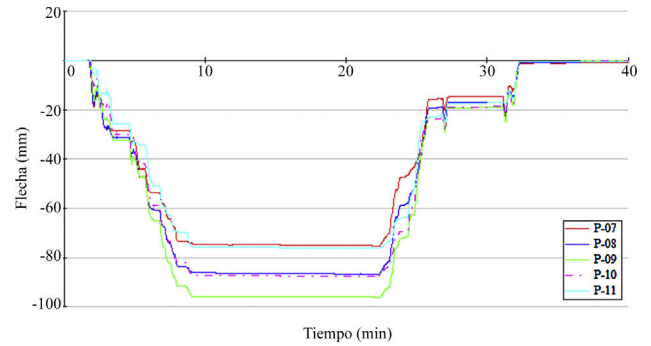


Figura 57. Desplazamientos obtenidos.



Figura 58. Tablón RILEM.

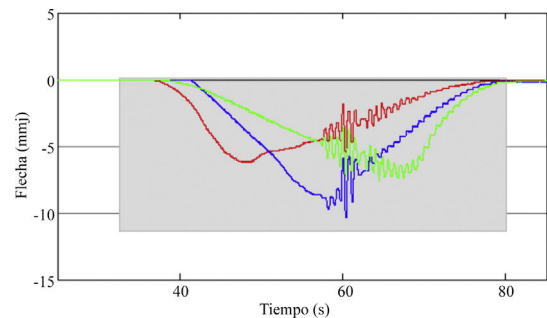


Figura 59. Deformaciones con RILEM.

7 puntos con acelerómetros triaxiales, y flechas en tres puntos a lo largo del eje central de la estructura (figs. 58-59).

Los ensayos dinámicos realizados sin tablón RILEM indican que el coeficiente de impacto es 1,0. Así mismo, las aceleraciones verticales medidas son inferiores a $0,5 \text{ m/s}^2$,

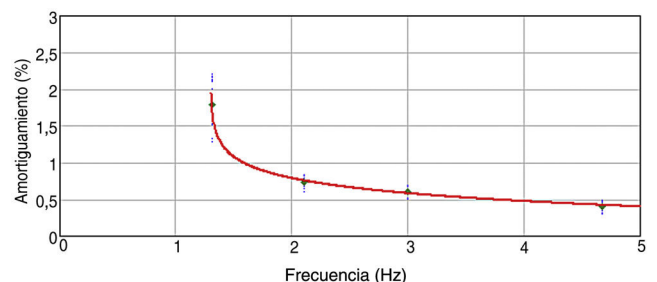


Figura 60. Amortiguamiento vs. frecuencia.



Figura 61. Vista del puente terminado (Foto: Carlos Garmendia).

y las horizontales menores que $0,1 \text{ m/s}^2$, lo que sitúa a la estructura en el Grado de Confort máximo según la norma española.

De los ensayos con tablón RILEM se obtuvieron las frecuencias de vibración de la estructura y el amortiguamiento. La frecuencia fundamental medida es de 1,31 Hz, frente a la teórica de 1,22 Hz. Se observó que el amortiguamiento decrece asintóticamente hasta 0,5% desde un valor de 1,5% para las frecuencias más altas (fig. 60). Tanto la prueba de carga dinámica como la estática arrojaron resultados satisfactorios.

6. Conclusión

El puente diseñado y construido (fig. 61) transmite transparencia y esbeltez, cumple con los requerimientos hidráulicos y tiene una escala adecuada a su entorno urbano. Se ha buscado crear un puente único, que sea representativo del estado del arte

como lo fueron otros puentes de Bilbao en su momento. Además, el hecho excepcional de que el cauce se excave tras su ejecución permite que el planteamiento de esta atípica tipología, al ser construida en seco, haya resultado viable económicamente.

Actualmente el puente se encuentra en servicio, pero aún no se ha finalizado la ejecución del canal que transformará la península de Zorrotzaurre en la futura isla.

Referencias

- [1] H. Beade, G. Capellán, P. Alfonso, M. García, J. Ruiz, R. Sobrino, Una solución innovadora para el nuevo puente de acceso a la futura isla de Zorrotzaurre en Bilbao, VII Congreso ACHE, Madrid, 2014.
- [2] R. Esparza, *Bilboko Portua*, Lunweg Editores, Barcelona, 2002.
- [3] M. Onzain, *La Ría de Bilbao*, Fundación Esteyco, Madrid, 1999.
- [4] G. Capellán, H. Beade, P. Alfonso, J. López, V. García, Design and construction of Frank Gehry Bridge. First access to New Island of Zorrotzaurre in Bilbao, 19th IABSE Congress, Stockholm, 2016.