

Montaje del puente sobre el canal de Deusto en el barrio de San Ignacio (Bilbao)*

*Construction sequence of the Bridge over Deusto Channel in San Ignacio Neighborhood, Bilbao***

Pablo Loscos Areoso ^a, Juan José Sánchez Ramírez ^b, Carlos Bajo Pavía ^c

^a Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Ferrovial-Agromán SA. Coordinador proyectos de Estructuras.

^b Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Ferrovial-Agromán SA. Jefe de Departamento de Estructuras.

^c Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Ferrovial-Agromán SA. Jefe de Área de Estructuras.

RESUMEN

El Puente sobre el canal de Deusto en el barrio de San Ignacio, Bilbao, es un arco de tablero intermedio de 75 metros de luz y comportamiento mixto entre arco-tirante y viga biempotrada. Con el objeto de simplificar y agilizar el proceso constructivo mediante la eliminación de los apoyos provisionales en el canal, se ideó una secuencia que combina el uso de transportes modulares autopropulsados (SPMT), con barcazas que los recogen, posicionando el tramo central del arco sobre los arranques previamente ejecutados desde ambas márgenes del canal. El ensamblaje del tramo central a transportar se realiza en una de las márgenes del canal, mientras que los arranques de arco y tablero se montan en voladizo desde ambos estribos.

ABSTRACT

The Bridge over Deusto Channel in the neighbourhood of San Ignacio, Bilbao, is a through-arch bridge with a span length of 75 meters and a combined behaviour between bow-string and double-fixed beam. In order to simplify and expedite the construction process by eliminating the temporary supports in the channel, a sequence was created combining the use of self-propelled modular transports (SPMT) with barges that pick them up, positioning the central section of the arch over the cantilevers previously installed both sides of the channel. The assembly of the central section to be transported is carried out on one side of the channel, while the members waiting each side are cantilevered from both abutments.

PALABRAS CLAVE: montaje, arco-tirante, plataforma autopropulsada, pontona, sistema articulado.

KEYWORDS: assembly, bow-string, SPMT, barge, pinned-system.

1. Descripción general de la estructura

En 2018 se informa a Ferrovial-Agromán de la adjudicación de la construcción del Puente de San Ignacio sobre el Canal de Deusto en el barrio de San Ignacio (Bilbao), cuya finalidad es garantizar la accesibilidad a la futura isla de Zorrotzaurre (ver figura 1).

El esquema resistente principal de la solución proyectada lo forman dos arcos mixtos simétricos. Los arcos arrancan desde el cauce bajo el tablero completando una luz total de 75 metros, de los cuales los 49 metros centrales se elevan sobre el tablero. Dos nervios longitudinales de acero son los encargados de llevar las cargas del tablero hasta los arcos, constituyendo además los tirantes a los que los

arcos están rígidamente unidos. El sistema de cuelgue lo forman barras de acero inoxidable de Grado 520 separadas 3 metros.

La sección de los arcos es de acero relleno de hormigón en todo su desarrollo, mientras que los nervios presentan sección rectangular de acero. Entre ambos nervios, el tablero está formado por una serie de vigas transversales y longitudinales de acero en doble-T a modo de emparrillado de nudos rígidos, sobre las que se ejecuta una losa de hormigón armado y parcialmente pretensado a la que se conectan todos los elementos metálicos. Exteriormente se diseñan sendos voladizos a ambos lados de los nervios, con vigas de acero de canto variable.

La estructura alberga una plataforma para dos carriles por sentido de circulación, un carril-bici y dos aceras, completando un ancho de 28 metros.

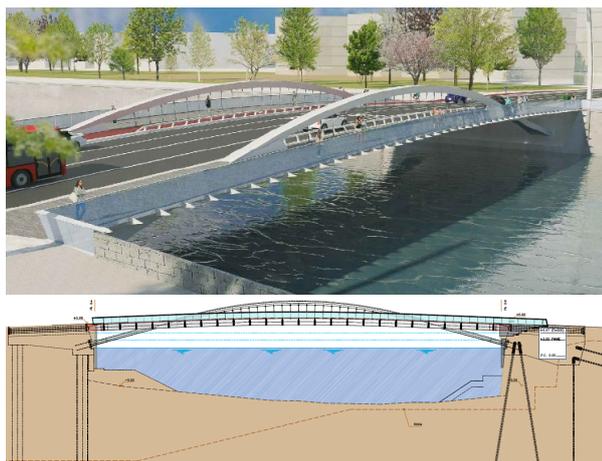


Figura 1. Vista general del puente de San Ignacio sobre el canal de Deusto en Bilbao

El sistema de cimentación, rediseñado por la Dirección Técnica de Ferrovial-Agromán, garantiza el empotramiento en los dos extremos de manera integral en el terreno. Se trata de una célula triangular cuyos elementos en contacto con el terreno proporcionan las reacciones de compresión y tracción que equilibran los esfuerzos exteriores de flexión. Por tratarse de una estructura integral, la subestructura hubo de ser diseñada para resistir, además de las flexiones de empotramiento general, las flexiones locales

que la superestructura le transmite a través de las acciones horizontales.

Cada una de las células de empotramiento se divide en dos macizos, uno por cada sistema de trabajo longitudinal de la estructura, es decir, por cada plano de arco y nervio. Se trata de elementos de hormigón armado, sólo pretensados en su parte superior para trasladar la tracción proveniente de los nervios hasta su parte trasera, y unidos por una losa de hormigón también pretensado.

Tanto las reacciones verticales de compresión delantera como las de tracción trasera se llevan al terreno mediante elementos muy diferentes en una y otra margen, debido fundamentalmente a las diferentes condiciones geotécnicas presentes a un lado y otro del canal.

En la margen izquierda se plantea la ejecución de pilotes perforados de 2 metros de diámetro para alcanzar la roca sana a una profundidad de casi 20 metros, y poder transmitir tanto las compresiones como las tracciones hasta este estrato, además de las importantes flexiones que producen las acciones horizontales sobre estos elementos con una altura “libre” tan significativa. En la zona de carrera de marea se recurrió a la galvanización de la jaula de armado, ya que la abertura de fisura de cálculo se situaba por encima de la máxima permitida para dicho ambiente.

En la margen derecha, por el contrario, la limolita sana aflora en superficie pero presenta un corte casi vertical a la altura de la entrada de carga de compresión delantera, estabilizándose su profundidad en unos 10 metros. En este caso, en lugar de pilotes perforados, se recurrió a micro-pilotes de barra empotrados en la roca sana de manera que le puedan transmitir la totalidad de las cargas mediante mecanismo de adherencia o fricción. En la parte delantera, para transmitir la compresión, se utilizaron micro-pilotes multi-barra (3 x 63.5 mm), mientras que en la parte trasera, para anclar las tracciones, se emplearon micro-pilotes de barra simple (75 mm).

2. Propuestas de proceso constructivo en fase de concurso

En el primer trimestre de 2017, durante la fase de concurso, se le encargó a la Dirección Técnica de Ferrovial-Agromán la realización de un estudio de la documentación aportada por el cliente con el objeto de realizar tres tipos de trabajos:

- Detectar posibles oportunidades de optimización o infra-dimensionamientos en el diseño original de la estructura.
- Proponer modificaciones estructurales con objeto de mejorar el diseño desde cualquier punto de vista.
- Estudiar variantes al proceso constructivo original que pudiesen presentar ventajas en rendimientos, plazos de ejecución o empleo de elementos auxiliares, etc.

Los puntos que siguen desarrollan este último aspecto del análisis realizado.

2.1 Proceso constructivo del proyecto original

El proceso constructivo del proyecto original (ver figura 2) conlleva las siguientes operaciones:

- Ejecución de las cimentaciones y los estribos, para lo cual se crean recintos "estancos" a base de sistemas de tablestacas metálicas.
- Instalación de los apoyos provisionales, constituidos por pilas micro-pilotadas dentro del canal.
- Relleno del intradós de estribos hasta cota inferior de arranque de arcos para habilitar una plataforma de trabajo.
- Colocación de los tramos de arranque de arco y tablero en ambos extremos sobre la plataforma de trabajo.
- Hormigonado de los tramos del arco recién colocados.

- Colocación de los 2 tramos centrales del arco y tablero mediante grúas situadas en ambas márgenes.
- Retirada de las tablestacas y apeos provisionales.
- Colocación del resto del tablero y hormigonado de losa y viga plana.

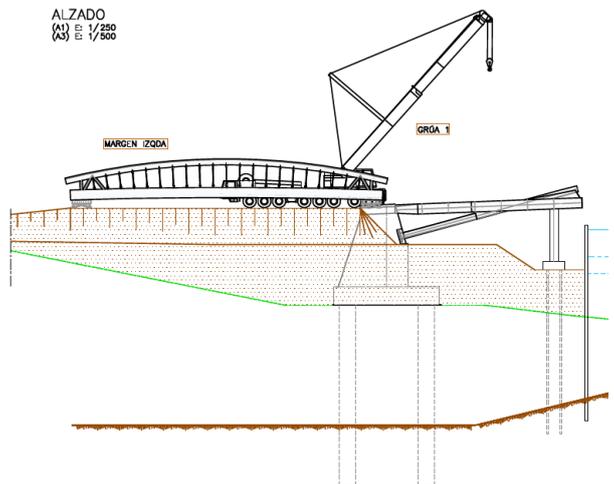


Figura 2. Imagen del proceso constructivo del proyecto original

2.2 Propuestas de modificación del proceso constructivo

Como se ha comentado, durante la fase de concurso se desarrollaron una serie de propuestas alternativas al proceso constructivo original. La idea fundamental que guía todas ellas es la agilización y simplificación de las operaciones de montaje que se desarrollan sobre el canal, de manera que la afección espacial y temporal sea la menor posible.

A continuación se expone brevemente cada una de ellas.

2.2.1. Montaje con grúa desde un estribo

La primera de las opciones que se estudió consistió en la colocación de toda la estructura metálica con una única grúa de 500 toneladas de capacidad máxima (ver figura 3). Este proceso de montaje consta de tres fases diferenciadas:

- Colocación de las ménsulas (nervio y arranque del arco) y hormigonado de los arranques del arco.
- Colocación de los bow-strings, y unión con las ménsulas previamente colocadas.
- Colocación del emparrillado por tramos, tanto más cortos (menos pesados) cuanto más nos alejamos de la posición de la grúa y, por tanto, aumentamos su brazo de trabajo.

Las maniobras más agresivas a las que tendría que hacer frente la grúa son las siguientes:

- Lanzamiento de uno de los bow-strings, con un peso de 80 Toneladas a una distancia de 40 metros.
- Lanzamiento del arranque de la margen derecha, con un peso de 25 toneladas colocado a 70 metros de distancia.

Consultando los catálogos de trabajo de las grúas comerciales, se llegó a la conclusión de que para realizar estas maniobras era necesario el uso de una grúa de 500 toneladas de capacidad máxima con un contrapeso convencional de 170 toneladas y otro contrapeso flotante de aproximadamente 240 toneladas.

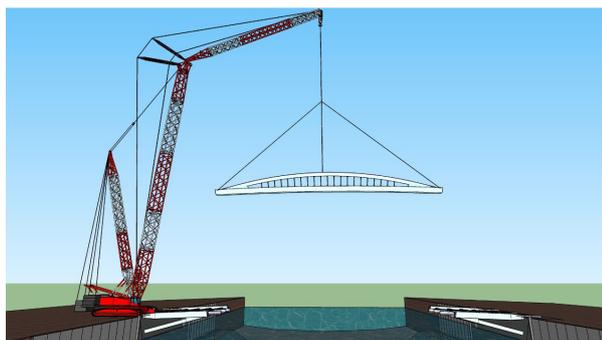


Figura 3. Propuesta de montaje con grúa desde un estribo

2.2.2. Empuje con pila intermedia o pontona delantera

La segunda alternativa estudiada (ver figura 4) consiste en la colocación de todo el tramo central de la estructura por empuje desde la margen izquierda, y con la ayuda de una pila

intermedia provisional. Este proceso de montaje consta de dos fases principales:

- Colocación de los arranques completos y hormigonado de los arranques de arcos.
- Empuje del resto de estructura metálica (bow-string central completo) desde la margen izquierda. La parte final del empuje se realizaría sobre los nervios de la ménsula de la margen izquierda.

Para posibilitar este procedimiento serían necesarios una serie de montantes verticales formados por perfiles HEB de manera que la estructura pudiese funcionar como una viga Vierendeel durante el empuje. La flecha máxima calculada durante el lanzamiento sería de unos 6 centímetros.

Con objeto de evitar la realización de un apoyo intermedio fijo, se estudió la posibilidad de utilizar una pontona que recogiese el extremo delantero del bow-string y lo acompañase durante la fase de empuje hasta su posición final.

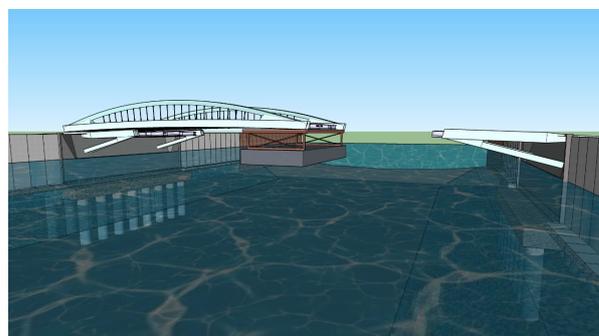


Figura 4. Propuesta de montaje por empuje con ayuda de pontona

2.2.3. Colocación por flotación con dos pontonas en los extremos

La tercera de las propuestas tiene por objeto colocar el bow-string completo por flotación, con la ayuda de dos pontonas en los extremos del mismo (ver figura 5). Este proceso de montaje consta de dos fases diferenciadas:

- Colocación de los arranques completos y hormigonado de los arranques de los arcos.

- Montaje del resto de estructura metálica (bow-string completo) en la margen izquierda, y posterior traslado por flotación de la estructura. Para ello se usarían dos pontonas, que sirven de apoyo del bow-string en sus extremos. Posteriormente se realizaría la unión del tramo central recién trasladado con los arranques, para completar la configuración definitiva de la estructura metálica.

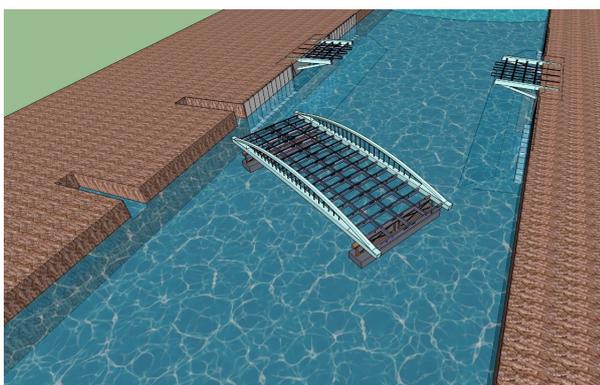


Figura 5. Propuesta de montaje por traslado con dos pontonas en los extremos

2.2.4. Colocación por flotación con dos pontonas en los extremos

La última propuesta se basa en la colocación del bow-string completo por flotación, con la ayuda de una pontona situada en el centro de la estructura (ver figura 6), pudiendo resumirse el proceso en los siguientes dos fases:

- Colocación de los arranques completos y hormigonado de los arranques de los arcos.
- Montaje del resto de estructura metálica (bow-string completo) en la margen izquierda, y posterior traslado por flotación de la estructura. Para ello se usaría una pontona que recibiría el bow-string y lo sostendría por su zona central.

Para que la estructura que se traslada pueda resistir correctamente los esfuerzos derivados de este proceso constructivo, habría

que disponer unos montantes verticales en los puntos de apoyo de la misma.

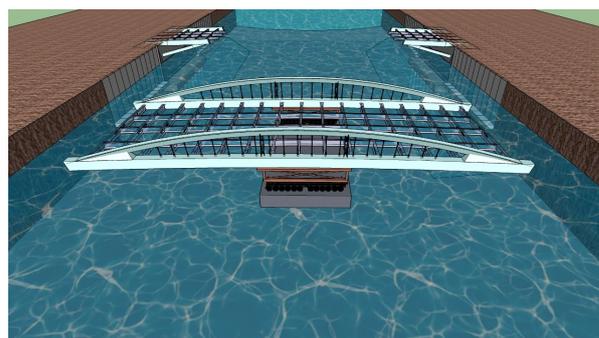


Figura 6. Propuesta de montaje por traslado con dos pontonas en los extremos

3. Proceso constructivo elegido en fase de diseño

Una vez la obra fue adjudicada, se profundizó en cada una de las alternativas comentadas anteriormente, evaluando todos los aspectos que afectaban a cada procedimiento, como son:

- Disponibilidad de medios auxiliares:
- Refuerzos necesarios en la estructura permanente.
- Agilidad y sencillez del proceso.

Finalmente, tras analizar todos estos aspectos, se planteó un montaje muy similar al esbozado en el punto 2.2.3, es decir, ensamblaje de bow-string completo en una de las orillas, y desplazamiento por agua a través de dos barcazas que recogen la estructura desde los extremos.

Se listan a continuación las principales fases que componen el proceso elegido, y en los siguientes apartados se profundizará en las particularidades de cada una de ellas.

- Ejecución de las cimentaciones de ambas márgenes.
- Ensamblaje y colocación de los arranques de cada uno de los extremos, tanto de arco como de tablero.
- Ensamblaje en la margen izquierda del bow-string completo.

- Recepción de la estructura por mediante dos juegos de SPMTs que la trasladan hasta las dos pontonas.
- Traslado de la estructura por flotación hasta su posición final.
- Guiado y descenso de la estructura sobre los arranques.
- Transferencia de carga de los SPMTs a los sistemas articulados de apoyo provisional.
- Bloqueo de las uniones, ejecución de las soldaduras de cierre de los nudos y transferencia de carga de los sistemas de apoyo provisional a las uniones definitivas.
- Ejecución de hormigonados de relleno de arcos y losa superior.
- Acabados y prueba de carga.

4. Descripción de las fases del proceso constructivo

4.1 Ejecución de cimentaciones

Como se ha comentado anteriormente, las cimentaciones están constituidas por células triangulares de empotramiento unidas integralmente con la superestructura. La solución estructural escogida para cada extremo es diferente, por lo que se describirá cada una por separado:

La cimentación de la margen izquierda se desarrolló al abrigo de un recinto tablestacado que resguardaba la zona de trabajo del agua del canal. Se realizó un relleno hasta la cota requerida por la plataforma de trabajo para poder ejecutar los pilotes perforados (ver figura 7). Una vez se concluyó la ejecución de los pilotes, se ferrallaron y ejecutaron los encepados en dos fases, la segunda de las cuales comprendía ya la losa que une ambos macizos. En el frente de la cimentación se dejaron embebidos los elementos necesarios para la unión de arcos,

nervios y vigas, constituidos por barras activas y placas de anclaje.



Figura 7. Ejecución de la cimentación de la margen izquierda

En la margen derecha, la totalidad de la cimentación se ejecutó al abrigo de un muro existente que, en teoría, debía independizar los trabajos de la entrada de agua. En la realidad, el muro no era capaz de mantener seca la zona de trabajo, por lo que se recurrió a la ayuda de un sistema de bombeo (ver figura 8).

La ejecución de estas cimentaciones comprendió las siguientes etapas: excavación en relleno y roca alterada, ejecución de micropilotes y hormigonado de macizos en varias fases hasta completar los macizos y la losa que los une.



Figura 8. Ejecución de la cimentación de la margen derecha

4.2 Ensamblaje de arranques en ambas márgenes y colocación en voladizo

Los arranques de ambas márgenes están formados por los tramos iniciales de arcos y de tirantes, unidos en su encuentro por un sistema

de chapas metálicas que materializan un nudo rígido en la parte delantera (ver figura 9). También se instalan en los arranques las vigas transversales que unen ambos planos de trabajo. Estos elementos se ensamblan y se colocan en la parte frontal de las cimentaciones, a las que se unen mediante barras pretensadas.



Figura 9. Ejecución de arranques

4.3 Ensamblaje de bow-string completo en la margen izquierda

La estructura principal, constituida por los tramos centrales de los dos arcos, los dos tirantes, las tres vigas longitudinales y todos los travesaños que refieren los elementos longitudinales entre sí, llegan a obra y se almacenan en una campa dispuesta en la margen izquierda, donde se realizan los trabajos de ensamblaje (ver figura 10).

Previamente a su desplazamiento se topografían los extremos para situar correctamente las cunas de recepción en los extremos de los arranques.



Figura 10. Ensamblaje de bow-string en campa

4.4 Recepción del bow-string mediante SPTMs y traslado a las pontonas

Una vez el bow-string está completamente terminado y topografiado, dos plataformas autopropulsadas recogen la estructura en sus dos extremos y la trasladan hasta las pontonas, que esperan amarradas a ambos márgenes mediante tirantes regulables (ver figura 11).

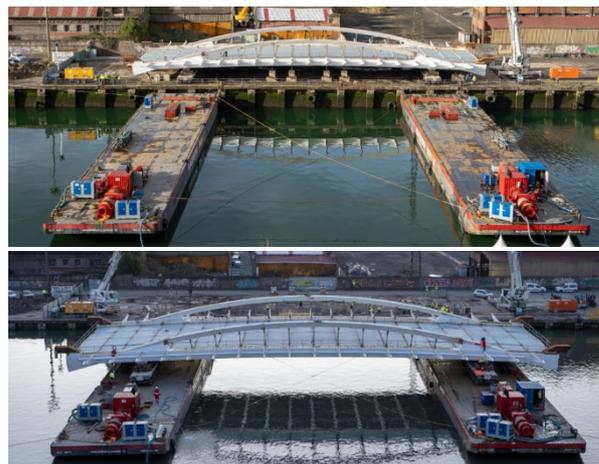


Figura 11. Recepción del bow-string y traslado a las pontonas

4.5 Traslado del bow-string hasta su posición definitiva

Mediante regulaciones controladas de los tirantes de amarre, la estructura situada sobre las pontonas es desplazada por flotación hasta su localización definitiva sobre los arranques (ver figura 12).

Para garantizar la seguridad de la maniobra se disponen unos amarres provisionales que refieren tanto la estructura a las pontonas como las pontonas entre sí. Las propias pontonas están amarradas a ambos márgenes del canal por cuatro amarres cada una, y son estos amarres los que propician el movimiento del sistema mediante regulaciones y cambio de posición acompañando al desplazamiento del sistema a lo largo del canal.



Figura 12. Traslado del bow-string por flotación

4.6 Colocación del bow-string sobre sistema articulado provisional

Una vez el bow-string alcanza su posición definitiva sobre los arranques (ver figura 13), se procede al descenso de la estructura aprovechando el cambio de marea y la capacidad hidráulica de las plataformas autopropulsadas. de manera que al término del proceso, el bow-string quedará apoyado en el sistema articulado provisional, diseñado para recibir la estructura sobre los arranques.

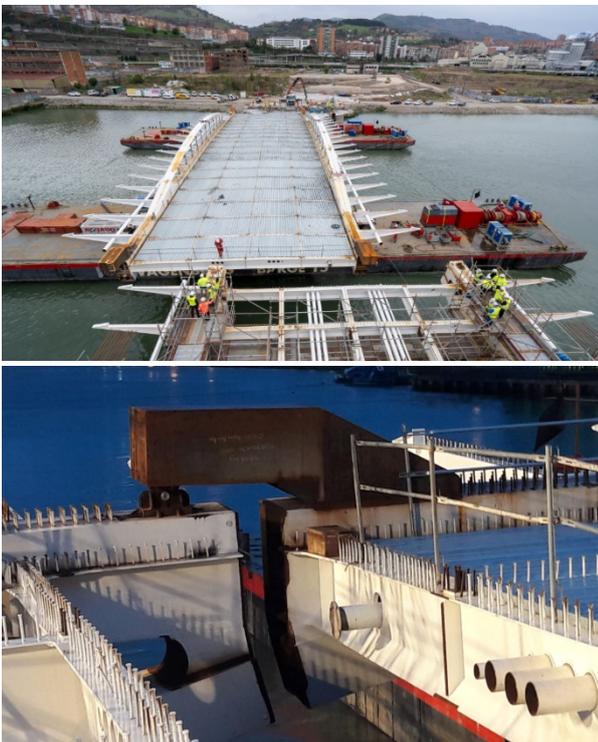


Figura 13. Colocación de bow-string sobre apoyos provisionales

Los apoyos provisionales incluyen un sistema de guiado, tanto transversal como longitudinal, que sitúa automáticamente la estructura a su posición final. El sistema coacciona los movimientos transversales en los cuatro apoyos, los longitudinales en los dos apoyos de uno de los extremos, pero permite los giros de eje transversal.

Cada apoyo provisional está compuesto por una cuna de recepción, una orejeta con bulón y una percha (ver figura 14). La cuna se sitúa sobre el extremo del arranque correspondiente y se compone de dos chapas longitudinales rigidizadas con un canal circular con aperturas a ambos lados, permitiendo cierto guiado longitudinal y el posicionamiento final. En uno de los extremos, la acanaladura presenta sobre-longitud, de manera que se puedan absorber pequeños errores topográficos y los efectos de las variaciones térmicas durante las maniobras.

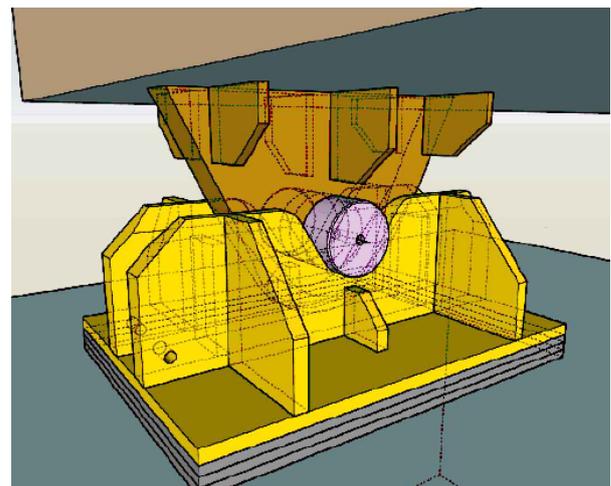
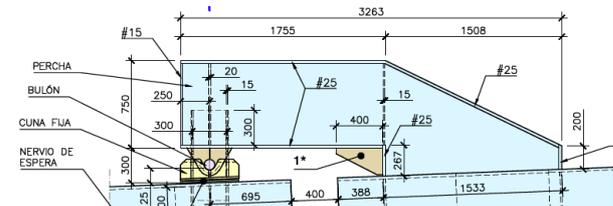


Figura 14. Definición de unión articulada provisional

La orejeta es un chapón rigidizado, soldado a la percha, en cuyo extremo se dispone un bulón que penetra en las acanaladuras de las cunas de recepción.

Por su parte, la percha es un elemento dispuesto en voladizo desde los extremos del bow-string, que salva los carretes dispuestos entre los arranques y el propio bow-string. La misión de dichos carretes es permitir cierta tolerancia en la posterior ejecución de la unión. Se trata de una caja de acero empotrada en el extremo del bow-string, con la resistencia y la rigidez suficiente como para no añadir incertidumbres geométricas al proceso.

Todos los elementos provisionales, tanto el sistema articulado de posicionamiento como las perchas de apoyo, así como los sistemas de bloqueo temporal de las uniones, no forman parte del proyecto principal de la estructura y fueron diseñados y calculados por la Dirección Técnica de Ferrovial-Agromán con la colaboración de AC Ingeniería (ver figura 15).

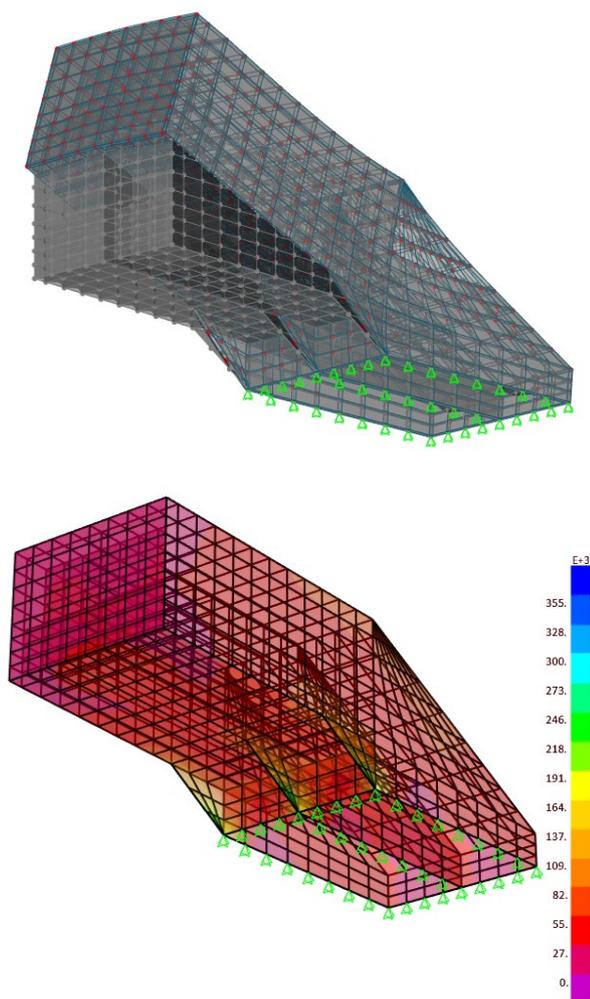


Figura 15. Modelo de cálculo de la percha

4.7 Ejecución de las uniones definitivas

Una vez el bow-string está posicionado en las cunas, las uniones permiten giros de eje trasnversal, y desplazamiento longitudinal en uno de los extremos.

Para coartar estos grados de libertad y poder ejecutar las uniones sin movimientos, se diseña un sistema de bloqueo provisional de la unión, constituido por perfiles que refieren los dos extremos de las uniones, tanto a nivel de tirantes como de arcos.

Una vez bloqueadas las uniones se procede a dar continuidad a todas las chapas longitudinales, tanto de arcos como de tirantes y vigas longitudinales, mediante soldadura.

La transferencia de carga entre el sistema de apoyo provisional y la unión definitiva se realiza por calentamiento progresivo, controlando deformaciones.

4.8 Fases finales de ejecución: relleno de hormigón de los arcos, ejecución de losa sobre tablero y acabados

Con la estructura metálica completamente terminada, se finaliza la construcción de la estructura con la ejecución de los elementos de hormigón, constituidos por los rellenos de los arcos y la ejecución de la losa del tablero.

Por último, se instalan los pavimentos, aceras y sistemas de contención para proceder a realizar la preceptiva prueba de carga antes de la puesta en servicio de la estructura.

Agradecimientos

En este apartado se debe incluir en primer lugar a todo el equipo de construcción del puente de San Ignacio sobre el canal de Deusto en Bilbao, y fundamentalmente a su jefe de obra Enrique de las Cuevas y al Delegado de zona Alberto Val, por su excelente disposición a la colaboración y la materialización de las propuestas planteadas por la Dirección Técnica.

También merece especial agradecimiento todo el equipo de la Asistencia Técnica, formado por AC Ingeniería y en su nombre Carlos Alonso y ATP ingeniería, dirigida por Alberto Pérez, que colaboraron en el desarrollo de todas las modificaciones realizadas respecto al diseño original con el objeto de alcanzar la mejor de las soluciones para el montaje de la estructura, y analizaron los diferentes escenarios que se plantearon para dicho montaje hasta alcanzar la solución final.

Por último, también se debe mencionar al equipo de expertos en el movimiento de grandes cargas de Royal Wagenborg, que además de proporcionar todos los sistemas auxiliares para el montaje del bow-string, aportaron su conocimiento y experiencia para diseñar todos los sistemas de amarre y desplazamiento.

Referencias

- [1] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, Ministerio de Fomento, España, 2008.
- [2] Comisión Permanente de Estructuras de Acero, Instrucción de Acero Estructural EAE, Ministerio de Fomento, España, 2012.
- [3] Comisión Permanente de Estructuras de Acero, Anejo Nacional AN/UNE-EN 1993-2, Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero, Parte 2: Puentes. Ministerio de Fomento, España, 2013.
- [4] Wagenborg Towage, Project Transport Manual, Installation of Bilbao Bridge “San Ignacio”, Royal Wagenborg, España, 2019.