

Diseño y construcción del Puente Móvil en Tappström (Suecia)

Design and construction of a Swing Bridge in Tappström (Sweden)

Fernando Cea Soriano 1^a, Rafael Martínez Turrado 2^b

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de sección. Departamento de Estructuras de TYPESA. Madrid. fcea@typsa.es

^b Ingeniero Técnico de Obras Públicas. Segment Sales Manager - Civil. MAMMOET. rafael.martinez@mammoet.com

RESUMEN

El nuevo puente móvil de acceso a la isla de Ekerö fue proyectado por TYPESA para el consorcio COMSA/YAPI MERKEZI como parte de la remodelación de la carretera Väg 261, siendo el cliente final TRAFIKVERKET, la Agencia de Transportes del Gobierno de Suecia. Los requerimientos de las especificaciones técnicas del proyecto dictaron que los movimientos del puente (izado y giro) se impulsen exclusivamente mediante motores electromecánicos. Las tolerancias de ejecución impuestas por los mecanismos obligaron a un control exhaustivo durante las operaciones definidas por MAMMOET, que incluyeron plataformas rodantes, un empuje y posteriormente el descenso sobre los apoyos definitivos.

ABSTRACT

The new swing bridge in the access to the Ekerö island was designed by TYPESA for the COMSA/YAPI MERKEZI consortium as part of the refurbishment of the Väg 261 road, with the final client being TRAFIKVERKET, the Swedish Transport Agency. The requirements of the technical specifications of the project dictated the movements of the bridge (lifting and swinging) to be driven exclusively by electromechanical engines. The execution tolerances imposed by the mechanisms required exhaustive topographical control during the assembly operations defined by MAMMOET, which included rolling platforms, launching operations and then lowering onto the final supports.

PALABRAS CLAVE: puente móvil, puente giratorio, Suecia, mecanismo, electromecánica, montaje.

KEYWORDS: movable bridge, swing bridge, Sweden, mechanism, electromechanics, assembly.

1. Introducción

Este artículo se centra en las singularidades del nuevo puente móvil en el acceso a la isla de Ekerö. Se analizarán en primer lugar los datos de partida y los condicionantes del diseño, antes de describir la solución. Se hace énfasis en algunos aspectos específicos del funcionamiento de los mecanismos, así como en particularidades del diseño en Suecia. Por último, se describen las maniobras de montaje y los medios auxiliares requeridos en particular por el tablero metálico.



Figura 1. Vista en planta durante la apertura.

2. Descripción general

2.1 Localización del proyecto

La carretera Väg 261 – Ekerövägen une la ciudad de Estocolmo con las islas Lovön y Ekerö, que se encuentran separadas por el río Tappström.

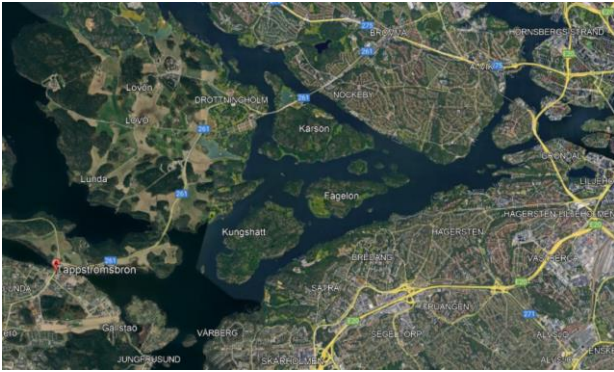


Figura 2. Localización del proyecto.

El proyecto se ubica en un entorno singularmente protegido, que incluye el Palacio de Drottningholm, declarado Patrimonio de la Humanidad por la Unesco en 1991.



Figura 3. Palacio de Drottningholm en la isla de Lovön junto a la carretera Väg 261.

2.2 El puente existente

Como parte de la remodelación de la carretera, se hizo preciso reemplazar el puente existente sobre dicho río Tappström, de un carril por sentido, por uno nuevo.

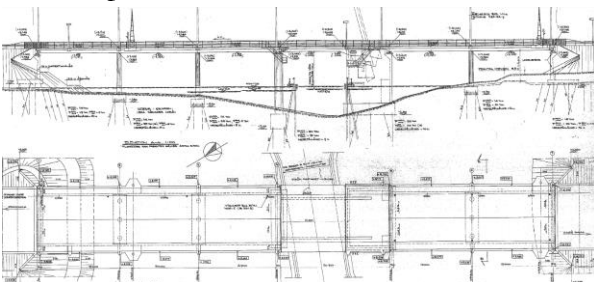


Figura 4. Puente basculante existente. Plano general.

El puente existente tiene un trazado recto en planta e incluye un vano basculante metálico, para el paso de embarcaciones de recreo. El resto del tablero consiste en un puente integral resuelto mediante una losa armada.



Figura 5. Puente basculante existente a reemplazar.

Durante su vida útil, el puente ya se había ampliado en su lado oeste para incluir un paseo peatonal. Asimismo, sus mecanismos habían sido modernizados en una actuación anterior.

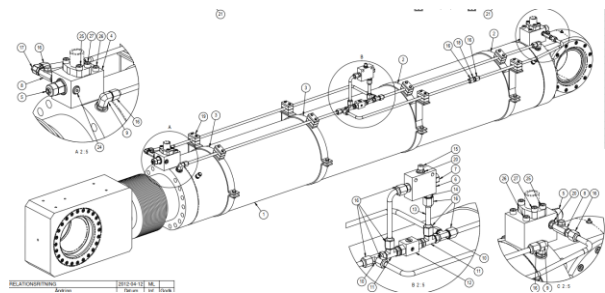
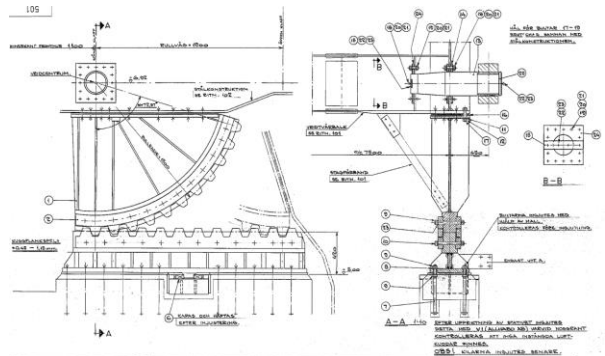


Figura 6. Puente existente. Parte del mecanismo original y de su modernización posterior.

2.2 Diseño referencial

Dada la necesidad de ampliar la carretera existente de uno a dos carriles por sentido e incluir un carril ciclista y peatonal de 4.0 m de ancho, se hizo preciso sustituir el puente existente por uno nuevo. El diseño referencial de Trafikverket incluía una definición del puente limitada, basada en requerimientos funcionales y

estéticos y con poco margen para propuestas técnicas, que debían estar muy justificadas.

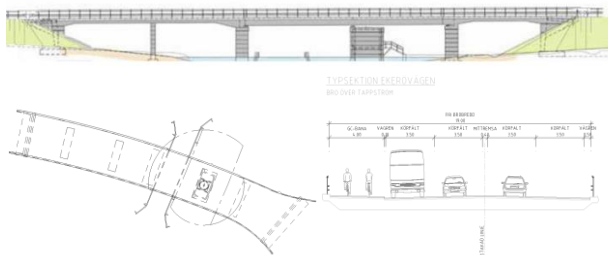


Figura 7. Proyecto Referencial.

El ancho libre entre barreras se fijaba en un mínimo de 19.0 m. Se imponía la limitación al canto de la estructura: 1.10 m de cota de trazado a cara inferior del tablero en el caso de 3 vanos y 1.60 m si se empleaban 2 vanos. Se permitía el uso de acartelamientos, de hasta 2.5 m de desarrollo con inclinación máxima 1:4.

El trazado estaba fijado y se conectaba al existente generando una curva en torno al puente existente. Dicha curva tenía un cambio de radio (de 500 m a 150 m) en la zona del tablero móvil y un ancho variable en la conexión con la glorieta, en el estribo norte.

En la planta, se habían fijado las luces de los vanos del tablero móvil en 25.0 m y 18.0 m a la vez que existía el requerimiento de que la máxima excentricidad de la carga permanente fuese de 75 mm. Este aspecto obligaba al empleo de un contrapeso en el vano de menor luz.

2.3 Proyecto de Construcción

La solución definitivamente construida incluye tres tableros: uno de tres vanos de hormigón resueltos mediante una losa armada y distribución 17.5 – 22.5 – 18.4 en el eje de estructura, otro metálico con dos vanos de 23.5 m y un último tablero de 14.5 m de luz, que también es una losa armada. Estas losas de hormigón incluyen acartelamientos sobre pilas y estribos.

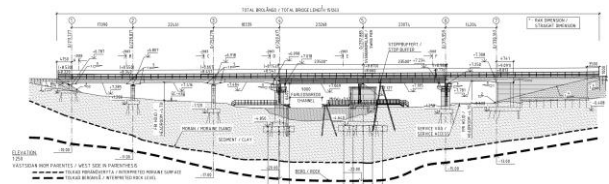


Figura 8. Alzado por el eje de trazado, de sur a norte.



Figura 9. Vista desde la pasarela de mantenimiento en el lado de la pila-pivote.

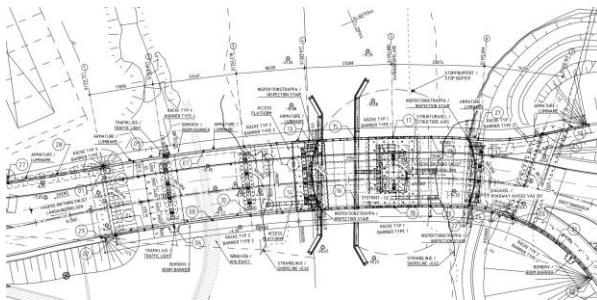


Figura 10. Planta de la estructura completa.

TRAFIKVERKET aceptó una propuesta de TYPSTA para pasar la parte móvil de una distribución 25.0-18.0 a 23.5-23.5 con lo que se eliminaba la necesidad del contrapeso.

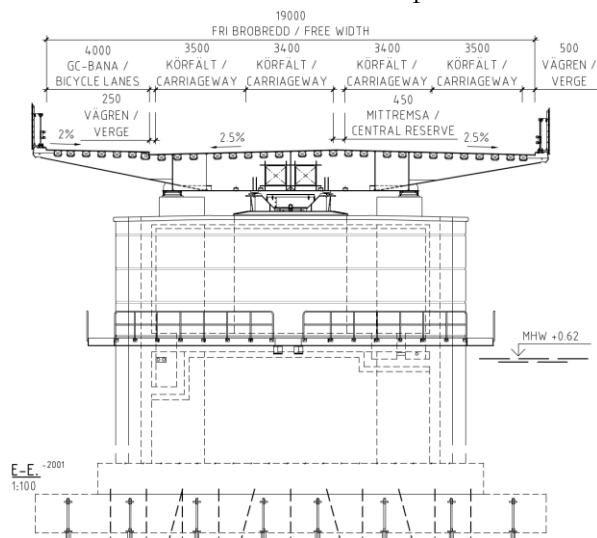


Figura 11. Sección tipo sobre pila-pivote.

El puente comprende por tanto 7 apoyos: dos estribos, dos pilas intermedias en la zona de losa de hormigón, dos pilas de junta entre tablero móvil y tableros fijos y una pila pivote.

2.3.1. Estribos (apoyos 1 y 7)

Cada uno de los estribos cumple una función distinta. Según el Pliego, el estribo sur debía integrarse en el entorno, minimizando su visibilidad y la afección a la carretera existente durante la construcción. Por ello, la solución consiste en un cargadero integral con el tablero del que sólo quedan vistos 400 mm en alzado. Por su parte, el estribo norte es un edificio de control que alberga aproximadamente 90 m² de cuartos asociados a las comunicaciones y el mantenimiento del puente.

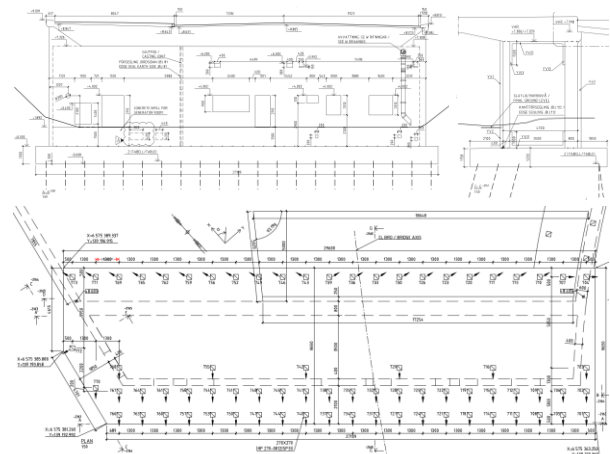


Figura 12. Alzado, sección y planta del estribo norte.

2.3.2. Pilas

Las pilas se resuelven mediante cuatro fustes de bordes redondeados: con sección circular de 1.0 m de diámetro para las pilas fuera del agua (apoyos 2 y 3) y con un tamaño de 2.5 m en longitudinal para las pilas de junta, que también se redondean con radios de 0.5 m.

Las diferencias en la definición geométrica de las pilas obedecen a su función. Las pilas de fustes alargados (apoyos 4 y 6) han sido diseñadas para soportar el impacto de las embarcaciones. Además, estos alzados incluyen plataformas de acceso al tablero desde el terreno y para el mantenimiento de los apoyos, amortiguadores, guías, juntas de dilatación, así como el propio tablero metálico.

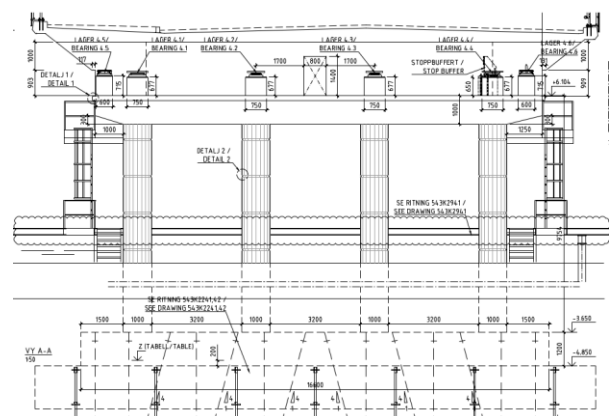


Figura 13. Sección tipo sobre soporte 4.

Dada la diferencia de peso entre el tablero de hormigón a un lado de la pila y el metálico al otro, se definió la excentricidad de los fustes de

manera que se centrara la carga permanente sobre la cimentación. El soporte 4 es singular puesto que recoge dos juntas de dilatación: una recta que separa el tablero de hormigón fijado al apoyo 1 del resto de la estructura y una curva para el tablero metálico. Entre ambas, se dispone un dintel solidario a la pila y con la sección del tablero de hormigón.

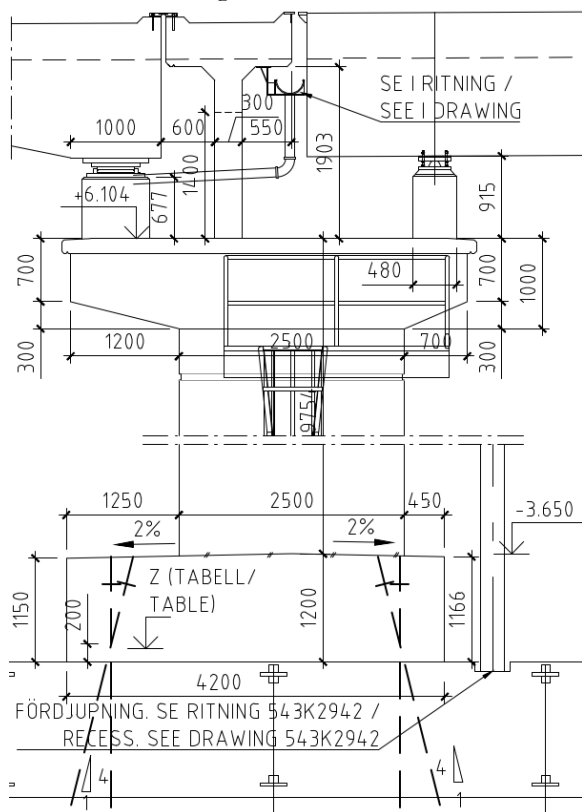


Figura 14. Sección longitudinal soporte 4.

2.3.3. Tableros

Durante la primera fase del proyecto se analizaron distintas alternativas para el tablero móvil. En lo relativo a la sección tipo se plantearon soluciones con uno, dos y tres cajones longitudinales, y costillas transversales. De igual manera, se plantearon soluciones con un tablero mixto o una losa metálica ortótropa.

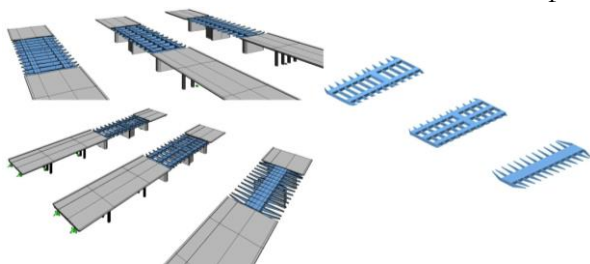


Figura 15. Alternativas para el tablero metálico.

De dicha comparativa se concluyó que la solución más eficiente era un cajón único con costillas y losa ortótropa y un pavimento de 10 mm de espesor, al ser la solución más ligera.

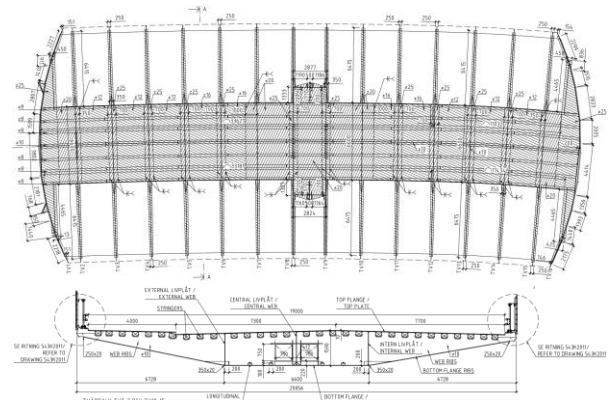


Figura 16. Alternativas para el tablero metálico.

2.3.4. Cimentaciones

En Suecia no es habitual el uso de pilotes perforados. Las cimentaciones se resuelven mediante micropilotes con carácter general y lo habitual es que todos los micropilotes sean inclinados. En aras de minimizar el coste de las cimentaciones, los contratistas solicitaron que la tipología de micropilotes se adaptase a los condicionantes de cada cimentación.

Como criterio de diseño, sólo se permitieron axiles de tracción en los micros bajo la consideración de carga de impacto en el soporte 4 y la defensa fluvial. Así, el apoyo 1 tenía micros perforados de 170 y 220 mm de diámetro y 10 mm de espesor, el apoyo 2 y 5 de 170 mm de diámetro y 12.5 mm de espesor, los apoyos 3, 6 y 7 prefabricados de hormigón de 270 mm de lado (SP2) y el apoyo 4 y las defensas emplean tubos de 270 mm de diámetro y 12.5 mm de espesor y barras entre Ø32 mm y Ø63.5 mm en el centro, para coger tracciones.

El cálculo estructural de las cimentaciones en Suecia requiere del seguimiento de las instrucciones de Pålkommissionen [4] tanto para la consideración de las características del terreno como para la capacidad estructural frente al pandeo asociada al tipo de terreno y el nivel de ejecución. Este fue uno de los trabajos que mayor estudio de los localismos requirió, junto con los elementos propios del puente móvil.

3. Elementos propios de un puente móvil en Suecia

Se describen a continuación elementos cuyo encaje está íntimamente relacionado con el estado del arte en los puentes móviles en Suecia.

3.1 Maquinaria y pila-pivote.

Siguiendo los requerimientos del Pliego, tanto el izado del puente como su posterior giro (de algo más de 90 grados) se realizan mediante elementos electromecánicos.

En las fases iniciales de diseño conceptual, TYPESA propuso no levantar el tablero. Para ello, frente a la filosofía de “levantar y girar” se hizo una propuesta para “liberar y girar” que consistía en colocar los apoyos de las pilas laterales (4 y 6) sobre un sistema de cuñas que puedan retirarse mediante gatos hidráulicos o dispositivos electromecánicos, de manera que no haya contacto y se pueda girar el tablero. Se mostraron ejemplos en Suecia con esta filosofía, como el Nockebybron o el Stäket.

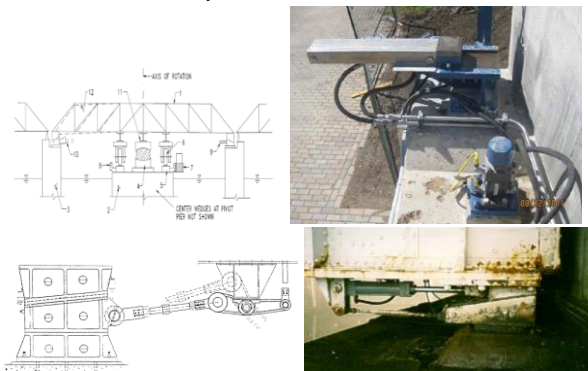


Figura 17. Figuras asociadas a “liberar y girar”.



Figura 18. Figuras asociadas a “levantar y girar”.

Al parecer, el origen de este requerimiento eran algunas patologías detectadas en puentes móviles antiguos, por lo que el izado del tablero se había convertido en un requerimiento y el empleo de elementos hidráulicos se quería limitar al mínimo.

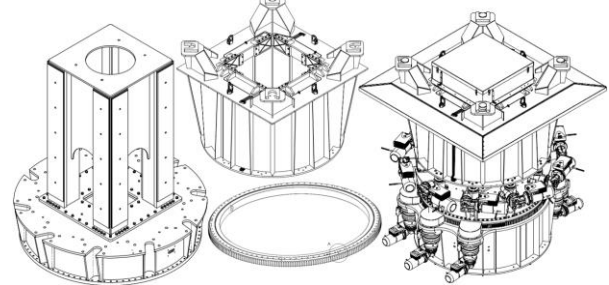


Figura 19. Pivote. Estructura metálica y maquinaria.

En la figura anterior se aprecia cómo la estructura metálica interior a la pila-pivote sobre la que se coloca el tablero, tiene una zona superior guiada por un cajón que hace de pasador. El conjunto levantado gira mediante un anillo de rodamientos de más de 3.0 m de diámetro. Se emplean 10 motores para el izado y 5 para el giro. El diseño de la maquinaria fue desarrollado por El-Bro; un proveedor local especializado en mecanismos.

La coronación de la estructura incluye cuatro soportes con una holgura de 20 mm, de modo que este conjunto sólo entra en carga una vez que se iza más de dicho valor.

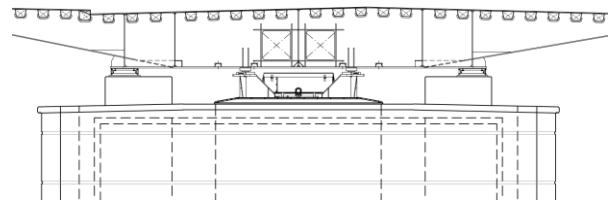


Figura 20. Pila-pivote. Apoyos de servicio (exteriores) y de giro (interiores).

La pila-pivote incluye un patinillo interior para las labores de mantenimiento y uno de sus laterales así como parte de la losa superior son desmontables, con el objeto de poder ejecutar un reemplazo completo de la maquinaria.

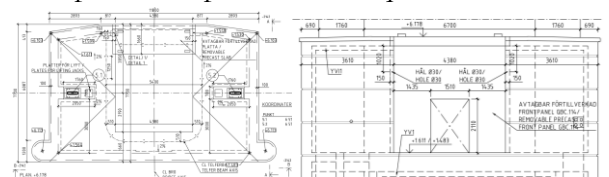


Figura 21. Pila-pivote. Zonas desmontables.

3.2 Apoyos y guías

De acuerdo con la normativa local, los puentes móviles deben disponer de elementos de centrado que aseguren el posicionamiento al devolver el puente a su posición. En este caso esto se hace mediante:

- Un apoyo con forma de muela en transversal en pilas 4 y 6 y uno en pila-pivote
- Dos apoyos con forma de muela en longitudinal en pila-pivote.
- Guías verticales en las pilas 4 y 6

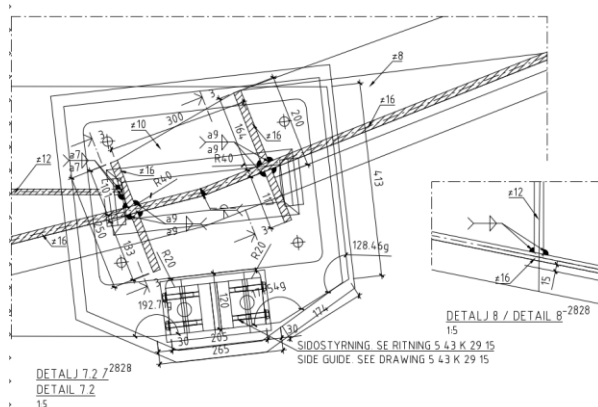


Figura 22. Planta con apoyo en forma de muela y guía.

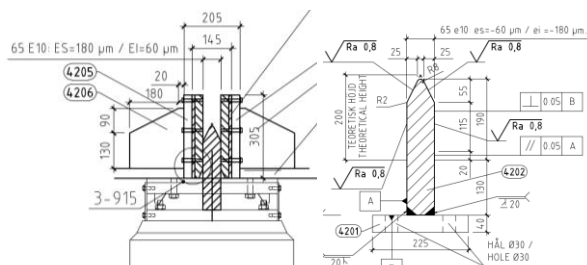


Figura 23. Detalle de guía lateral. Alzado.

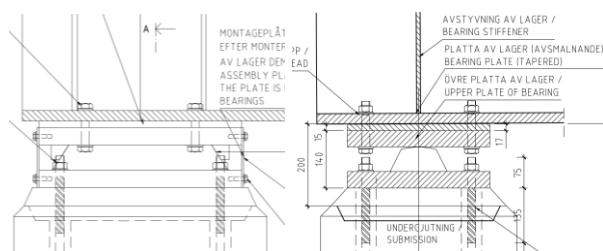


Figura 24. Detalles de apoyo acero-acero guiado.

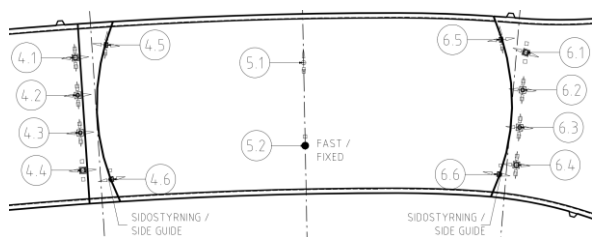


Figura 25. Localización de apoyos y guías.

3.3 Amortiguadores (buffers)

El final de la apertura y el del cierre se controlan mediante unos elementos hidráulicos (buffers) que amortiguan el impacto. Hay uno fuera del puente sustentado por tres pilotes inclinados que actúa como tope cuando el puente se abre y otro en la pila 4 para la maniobra de cierre.

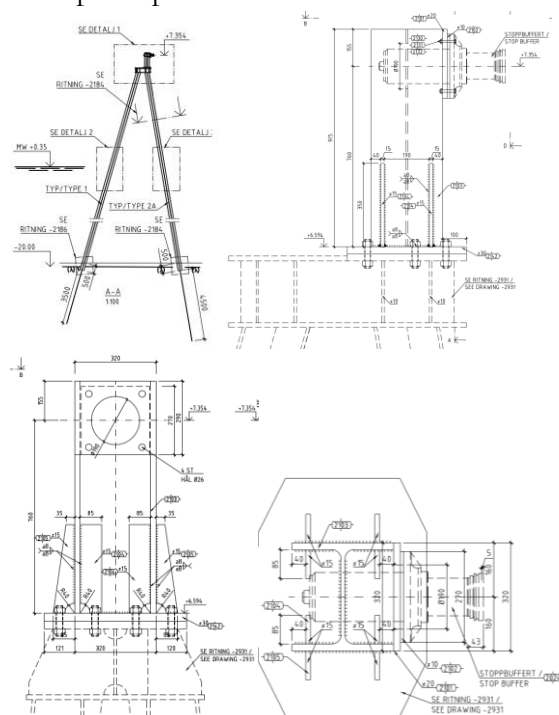


Figura 26. Buffer para apertura.

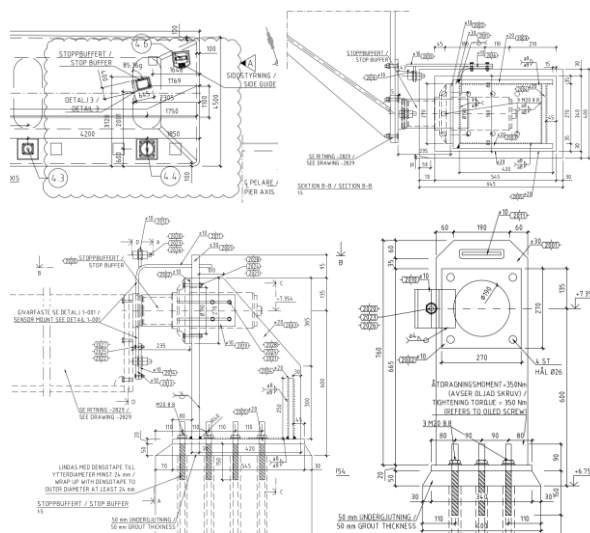


Figura 27. Buffer para el cierre. Pila 4.

3.4 Defensa fluvial (ledverk) y pasarelas

Una particularidad de estas defensas es que se calculan para el impacto de los barcos y la acción solicitante depende de su deformabilidad. Por

dicho motivo, la unión en la dirección del tráfico fluvial en algunas pilas es una articulación, con el fin de flexibilizar la estructura en esa dirección. Destaca también el detalle de protección de sus pilotes contar las heladas.

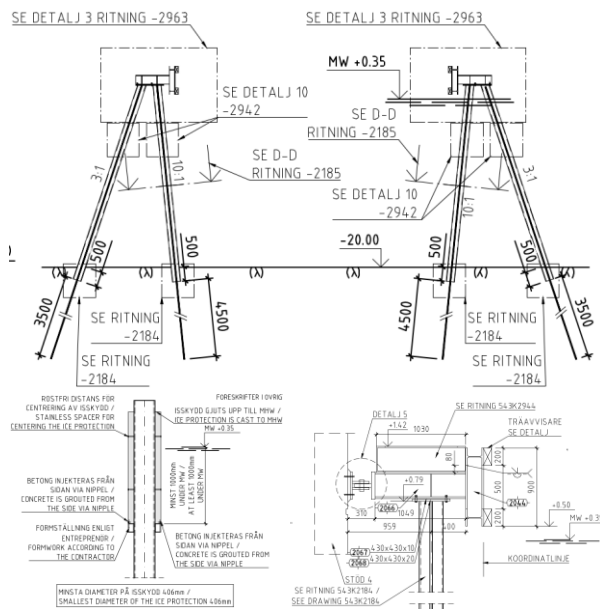


Figura 28. Defensa fluvial y pasarela.

4. Montaje del tablero metálico

La definición de la solución óptima de montaje del tablero móvil atravesó varias etapas durante el desarrollo del proyecto, valorándose sucesivamente distintas metodologías constructivas por parte de los equipos de TYPASA, COMSA/YAPI MERKEZI y MAMMOET. En todas ellas se hacía evidente la necesidad de instalar la mencionada sección móvil en una sola pieza, convirtiendo por tanto la operación, dada la envergadura del tramo, en una maniobra de manejo de cargas pesadas o *heavy lifting*.

Descartado el montaje convencional con grúas, debido a la magnitud de la carga a manejar y al gran radio de trabajo, se plantea desde las primeras fases del desarrollo de la ingeniería de proyecto una alternativa de empuje de cierta complejidad, que la aleja del típico lanzamiento incremental convencional. Nos encontramos más ante una maniobra de traslación que ante un

empuje propiamente dicho, y con ese aspecto principal en mente, la utilización de carretones autopropulsados tipo SPMT se revela como la mejor alternativa posible.



Figura 29. Carretones SPMT trasladando el tablero

La posición de partida del movimiento de traslación se sitúa en la propia traza del puente, tras el estribo norte. Para ejecutar el avance, se valora en un primer momento disponer tres conjuntos de carretones, dos de ellos situados sobre el vano de hormigón P6-P7 y un tercero sobre una península o pequeña mota en el cauce, entre el estribo norte y la pila-pivote.

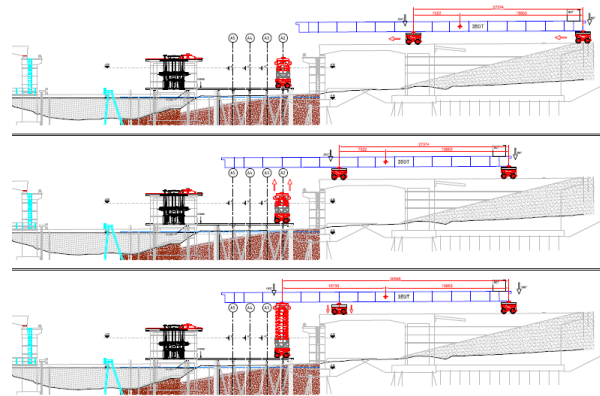


Figura 30. Concepto inicial de traslación con carretones SPMT situados en el cauce

A fin de minimizar la afección y el uso de maquinaria pesada en la zona de terreno ganado al cauce, los equipos de COMSA/YAPI MERKEZI y MAMMOET plantean una nueva alternativa que permite, mediante una estructura temporal auto-trepante dispuesta sobre la pila-pivote, acortar la luz de empuje y alcanzar la pila con el puente en voladizo, evitando por tanto cualquier apoyo intermedio.

Se definen a continuación las distintas fases de la operación y los equipos especiales *heavy lifting* involucrados en cada una de ellas.

4.1 Avance sobre el vano P6-P7 mediante carretones SPMT

En una primera fase, con el tablero dispuesto sobre sus apoyos de construcción, se toma la carga de este mediante las suspensiones hidráulicas de dos conjuntos de carretones de transporte autopropulsados tipo SPMT, de 12 y 10 ejes respectivamente, avanzando a continuación hasta la situación de voladizo máximo.

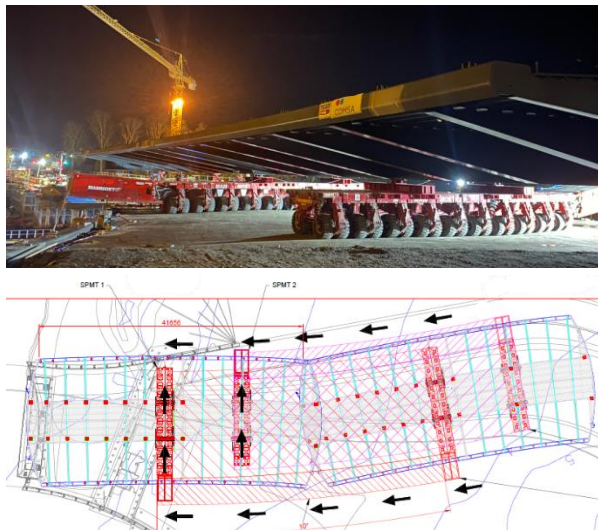


Figura 30. Fotografía y vista en planta del movimiento de los carretones SPMT

4.2 Recogida del voladizo en pila y avance conjunto con carretones SPMT sobre el vano P6-P7 y patines hidráulicos (skidshoes) sobre la estructura temporal de pila

Una vez alcanzado el voladizo máximo previsto, la sección frontal del tablero se encuentra sobre la vertical de la estructura temporal previamente ensamblada sobre la pila-pivote, y se procede a descansar el voladizo sobre aquella.

Esta estructura está formada, desde arriba hacia abajo, por 6 patines hidráulicos tipo *skidshoe* de 150 toneladas de capacidad unitaria, los cuales

deslizan a lo largo de dos vigas longitudinales montadas sobre sendas parejas de torres.

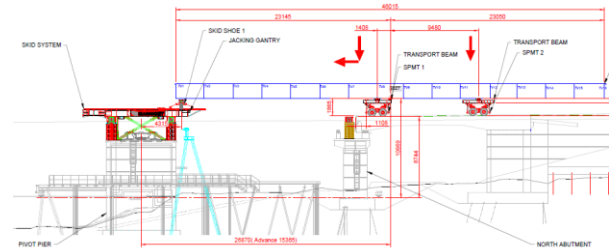


Figura 31. Llegada del voladizo a la estructura temporal sobre la pila-pivote

A su vez, y con el objetivo final de poder descender en la fase final la estructura y con ella el tablero, estas torres están constituidas cada una por un gato de trepa dispuesto sobre un castillete de perfiles metálicos cruzados alternativamente, atornillados entre sí y arriostrados frente a esfuerzos horizontales.



Figura 32. Detalle de la estructura de deslizamiento & gateo sobre la pila-pivote

El tablero continúa su avance mediante un movimiento acompasado de los SPMTs situados sobre el vano P6-P7 y sucesivos avances y apoyos del sistema de *skidshoes* en la pila-pivote.

4.3 Tablero completo sobre estructura de pila, avances y apoyos sucesivos mediante patines hidráulicos (skidshoes)

Siguiendo la secuencia anteriormente descrita, se van retirando sucesivamente ambos conjuntos de SPMT a medida que estos se aproximan al estribo, hasta situar el centro de gravedad del tablero dentro de la estructura temporal de la pila-pivote, continuando los avances mediante el uso exclusivo del sistema de *skidshoes*.



Figura 33. Fotografías previa y posterior al descenso final sobre apoyos definitivos

4.4 Llegada a la vertical de la posición final: descenso de la estructura temporal de pila-pivote y apeo final

En una última fase, y tras alcanzar la vertical de la posición definitiva del tablero, se procede al descenso final de este mediante dos operaciones consecutivas.

Inicialmente, se ejecuta un descenso de la estructura completa de la pila-pivote mediante la operación de los gatos de trepa y la retirada progresiva durante el descenso de una hilera de perfiles metálicos en cada carrera del pistón del gato, completando una bajada total aproximada de 1900 mm. Al final de este ganeo, se transfiere la carga del tablero a 4 gatos adicionales de trepa previamente emplazados en las pilas laterales del tablero móvil, sobre castilletes de madera de alta resistencia y con capacidad de ajuste en planta. En la última fase y tras desmontar la estructura temporal de pila, se completa el ganeo final sobre apoyos definitivos mediante los gatos de trepa anteriormente mencionados, con un descenso esta vez de unos 1600 mm.

Agradecimientos

Los autores de este artículo quieren agradecer al equipo de obra y a los Servicios Técnicos de COMSA la colaboración prestada durante el desarrollo de los trabajos.

Referencias

- [1] Bro Över Jerumsälven. Väg E6. SKANSKA, 2014.
- [2] Railway bridge over the Göta River and over E45 and Sävån. SKANSKA, 2016.
- [3] Bro Över Svartån vid Bygärdegatan. Skebäcksbron, Örebro Municipality. ELU-konsult, 2001.
- [4] Motala. Järnvägsbro Över Göta Kanal. ELU-konsult, 2011.
- [5] Pålkommissionen. Teknisk PM 1:2018. Bärförmåga för axiellt belastade pälår i de nordiska länderna – rekommendationer för revision av Eurocode 7. Capacidad estructural de pilotes cargados axialmente en los países nórdicos: recomendaciones para la revisión del Eurocódigo 7.