

Puente Giratorio de Tappström (Estocolmo, Suecia). Adaptación diseño y construcción del tablero metálico

Swing bridge of Tappström (Stockholm, Sweden). Adaption of design and construction of the steel deck

Juan Víctor Tirado Gascón^a, Benjamín Domínguez Santana^b, Rafael Pedro Martínez Turrado^c y Manuel Moreno Yáñez^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. COMSA CORPORACIÓN. Jefe del Departamento Técnico. juan.tirado@comsa.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. COMSA CORPORACIÓN. Ingeniero especialista de puentes

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

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MAMMOET. Project Manager. manuel.moreno@mammoet.com

RESUMEN

El nuevo puente de Tappström presenta un tramo giratorio formado por un tablero metálico de 46 m de longitud y 300 toneladas de peso. En este artículo se describe el complejo proceso constructivo (lanzamiento y descenso) y los cambios que se realizaron para adaptar el diseño original del tablero a dicho proceso.

ABSTRACT

The new Tappström bridge has a swinging segment formed by a steel deck 46 m long that weighs 300 tons. This article describes the complex construction process (launching and lowering) and the changes made in order to adapt the original design of the deck to the construction process.

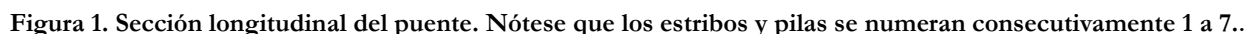
PALABRAS CLAVE: Puente móvil, puente giratorio, lanzamiento, descenso, heavy lifting.

KEYWORDS: Movable bridge, swing bridge, launching, lowering, heavy lifting.

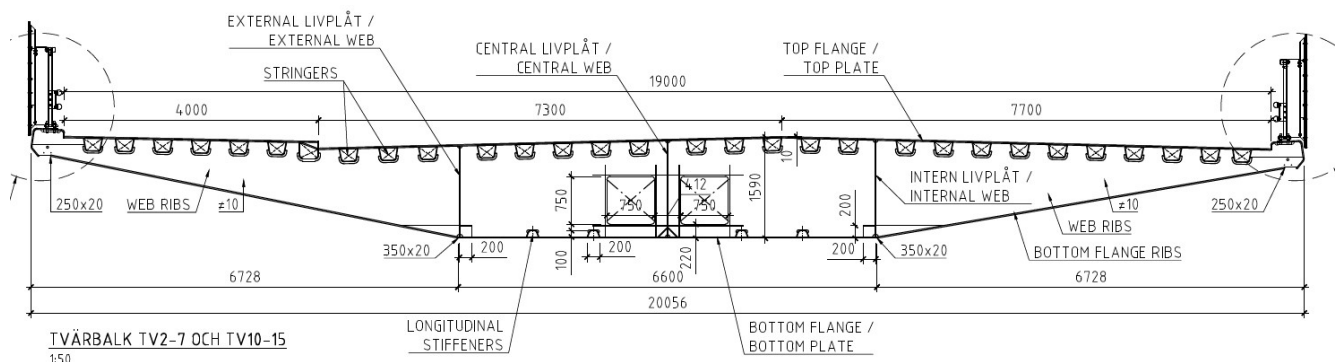
1. Introducción

El nuevo puente de Tappström presenta un tramo móvil giratorio, está situado en la carretera comarcal 261 y da acceso al municipio de Ekerö (Estocolmo, Suecia). Sustituye al puente anterior que también era móvil, aunque de apertura basculante. Su sustitución se decidió debido a la necesidad de ampliar la calzada de 2 a 4 carriles, que resultaba muy difícil por su propia condición de puente móvil y por su estado estructural, que presentaba el deterioro propio del paso de los años.

Las obras fueron adjudicadas a las empresas COMSA y Yapi Merkezi en base a un contrato de proyecto y obra (design and build). El diseño fue desarrollado por Tyspa en 2020 (y es objeto de otra ponencia de este mismo congreso). La ejecución del puente fue llevada a cabo por COMSA, y el tramo metálico en particular por TECADE (fabricación y suministro del tablero metálico) y MAMMOET (montaje de dicho tablero) en 2022.

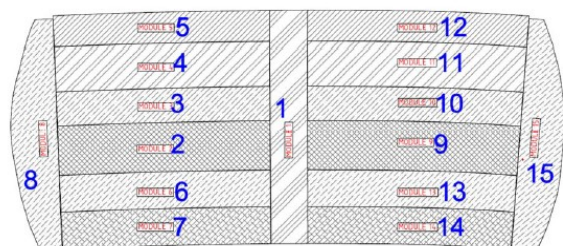


Este tramo metálico mide 47 m entre juntas, pesa casi 300 t y permite abrir el puente mediante un giro alrededor de la pila 5.



2. Procedimiento constructivo del tramo metálico

El tablero se fabricó en el taller que Tecade tiene en Sevilla y para su transporte a obra se subdividió en 15 módulos, que posteriormente se ensamblaron en obra en el terraplén situado detrás del estribo Norte (estribo 7).



Para la colocación en su posición definitiva sobre los vanos 4 y 5 fue necesario ejecutar un procedimiento constructivo ad hoc que comprendía 16 etapas que pueden agruparse en 3 operaciones o movimientos: transporte o traslación hasta la pila 6, lanzamiento hasta la pila 4, descenso a su posición final.

2.1 Traslación hasta la pila 6

La traslación se realizó mediante dos carros o plataformas de varios ejes llamadas Self-Propelled Modular Transporter, que en adelante denominaremos por sus iniciales SPMT.

Se trata de un sistema de carretones de gran capacidad formado por módulos interconectables tanto longitudinal como transversalmente, que permiten configurar plataformas de transporte de las dimensiones y capacidad portante necesarias para cada maniobra.

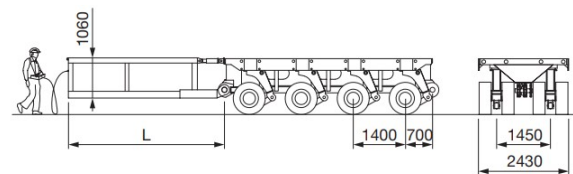


Figura 5. Dimensiones de un módulo estándar de 4 ejes, incluyendo la unidad de potencia

Cada uno de estos módulos está formado por una fila de 4 o de 6 ejes, mientras que cada eje dispone de dos suspensiones hidráulicas, las cuales tienen respectivamente una capacidad de carga neta que se sitúa en el entorno de las 20 toneladas por suspensión.

Una vez conectados mecánica, hidráulica y electrónicamente todos los módulos requeridos, se opera la plataforma de transporte completa desde un solo mando de control como si fuese un único vehículo.

La principal característica de estos equipos, aparte su alta capacidad de carga, es su gran maniobrabilidad, ya que cada suspensión hidráulica cuenta con un motor que la hace independiente de las demás, permitiendo por tanto así un rango de giro de cada una de las suspensiones de 360° respecto a su eje vertical.

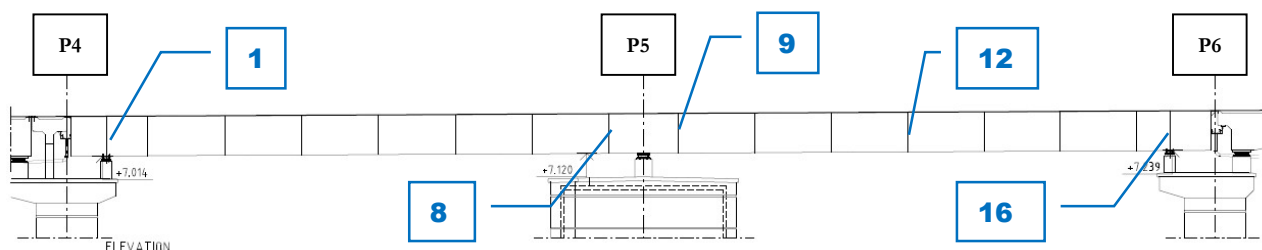


Figura 6. Sección longitudinal vanos 4 y 5 con numeración de diafragmas.

Para la realización de las maniobras de empuje del Puente de Tappström, se utilizaron un total de 22 ejes SPMT, componiendo 2 plataformas de transporte de 12 y 10 ejes respectivamente.



Figura 7. Plataformas SPMT sosteniendo el tablero en diafragmas 8 y 12.

El primero de ellos se situaba debajo del diafragma 8 y el segundo en el 12. Conviene resaltar que en el trayecto de este desplazamiento, y para el posterior lanzamiento, los SPMT pasaron por el vano 6, cuyo tablero de hormigón armado tuvo que ser levemente reforzado para resistir las cargas transmitidas por dichos carros.

2.2 Lanzamiento sobre vanos 4 y 5

La operación de lanzamiento se inició cuando el extremo del tablero metálico llegó a la pila 6. Además de los SPMT, para esta operación fue necesaria la construcción de una estructura auxiliar y un sistema de deslizamiento guiado sobre la pila 5.

Con el objetivo de acortar la luz y con ello el voladizo máximo durante el lanzamiento, y alcanzar así la pila central sin necesidad de apoyos intermedios ni contrapeso trasero, se dispuso sobre la pila 5 una estructura temporal que tiene dos funciones principales. Por un lado, mediante patines hidráulicos o *skids* recoge el voladizo y hace posible el deslizamiento del tablero hasta la pila 4. Por otro, una vez finalizado el empuje y mediante gatos de trepa, permite la realización de la primera fase de descenso del tablero que se describe en el apartado 2.3.

La estructura está formada por dos vigas principales que materializan sendas líneas de deslizamiento, sobre cada una de las cuales circulan 3 patines hidráulicos tipo *skidshoe* de 150 t de capacidad unitaria. A su vez, las vigas se apoyan sobre 2 parejas de torres constituidas cada una por un gato de trepa de 500 t de capacidad, dispuesto sobre un castillete de perfiles metálicos HEB120 contrapeados. El sistema de deslizamiento mediante *skids* se compone de patines hidráulicos de forma trapezoidal formados por una estructura metálica de gran rigidez que aloja un cilindro hidráulico cuya capacidad marca la denominación del sistema. En el caso de los utilizados en Tappström estamos ante *skids* de 150 t.

La cara inferior del *skidshoe* cuenta con un acabado en acero inoxidable pulido que permite el deslizamiento a bajo rozamiento sobre planchas de neopreno zunchado recubiertas de teflón.

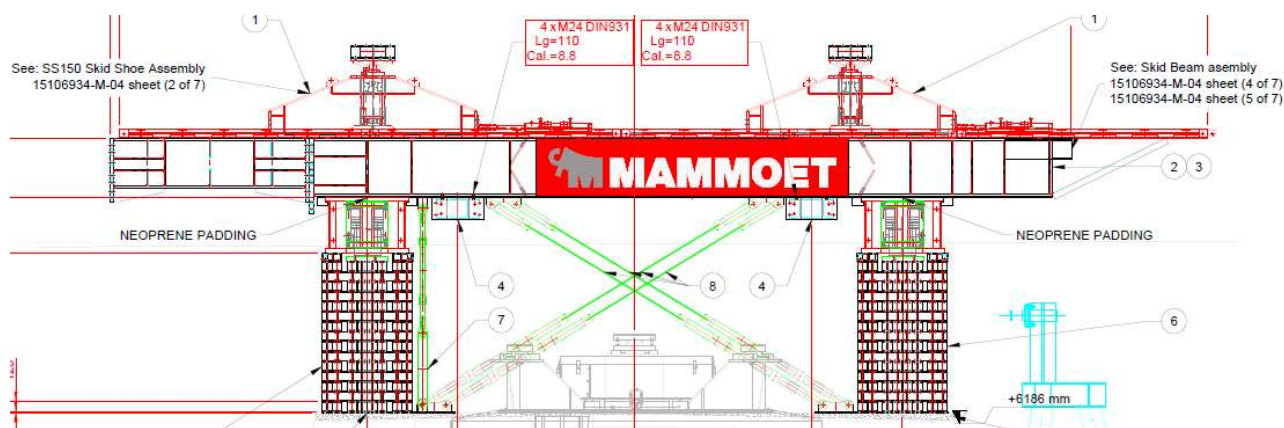


Figura 8. Estructura temporal sobre la pila 5

A su vez, estas planchas se alojan dentro de un sistema de carriles metálicos, el cual ejerce las funciones por un lado de guiado lateral del sistema, y por otro sirve de punto de reacción para los cilindros horizontales que proporcionan la fuerza motriz al conjunto, los cuales se conectan al *skidshoe* mediante una unión embulonada.

La siguiente figura muestra el *skidshoe* de 150 t de capacidad.

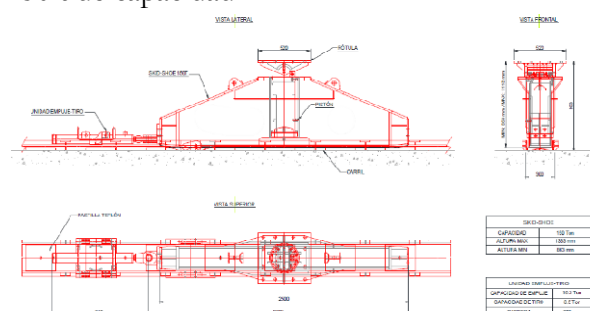


Figura 9. Skidshoe o patín hidráulico de deslizamiento de 150 tn.

La operación de lanzamiento es la más laboriosa de todo el proceso, pues está subdividida en múltiples etapas, de las que a continuación citamos las principales:

Avance desde pila 6 hasta pila 5. Este desplazamiento se realizó mediante los SPMT. Cuando el extremo delantero del tablero llegó a la pila 5, éste se apoyó en un par de patines que se situaron debajo del diafragma 1. A continuación, se transfirió la carga desde el SPMT del diafragma 8 a los patines mencionados. Como se ha explicado, cada

skidshoe tiene un cilindro hidráulico de 150 t, cuyo pistón se va elevando progresivamente para contactar con el tablero en primer lugar y, a continuación, levantar la punta del tablero hasta que éste se desprege del SPMT del diafragma 8.

En ese momento se ha completado la transferencia de cargas y dicho carro SPMT puede ser retirado, de forma que el tablero queda apoyado en el diafragma 1 (sobre patines) y en el 12 (sobre el SPMT).



Figura 10. Apoyo del extremo del tablero en los patines de la pila 5.

Avance de 7 m, introducción de un segundo par de patines y 3 ciclos de avance de 3.1 m (distancia entre diafragmas). En estas etapas el tablero se mueve apoyado en el SPMT debajo de diafragma 12 y una pareja de patines que deslizan sobre la pila 5, pero que van cambiando su diafragma de soporte en el tablero. Para estos ciclos se necesita una segunda pareja de patines ubicados en la misma estructura auxiliar de la pila 5, pero posicionados dos diafragmas por detrás.

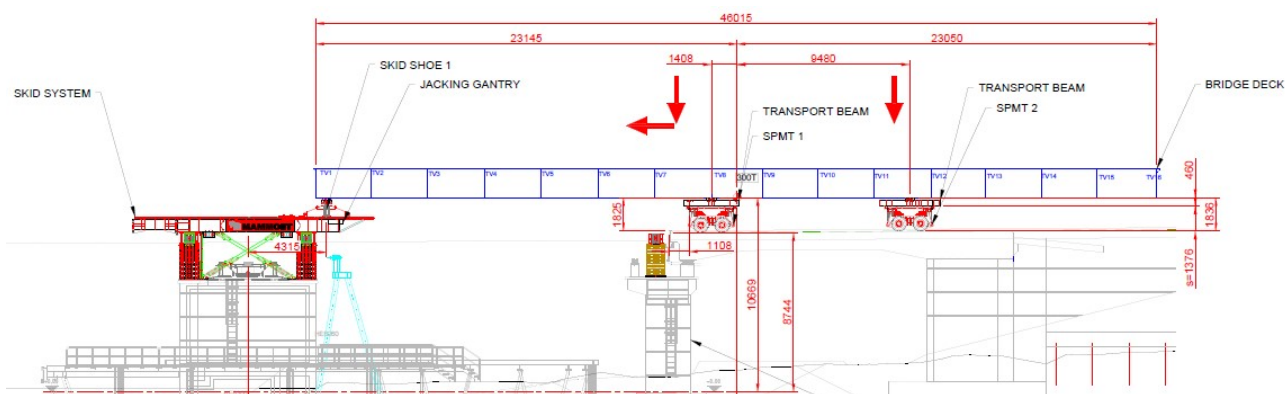


Figura 11. Posición del tablero al llegar a la pila 5

Al final de cada avance, el tablero se apoya provisionalmente en esta pareja trasera de patines, de forma que los patines delanteros queden descargados y puedan retroceder hasta situarse debajo del siguiente diafragma. A continuación, el apoyo del tablero se transfiere de los patines traseros a los delanteros, y de esta manera comienza el siguiente ciclo de avance.

Cambio de SPMT. Cuando el diafragma 12 llegó a la pila 6, el lanzamiento no podía seguir avanzando. Por eso, se colocó otro SPMT (el retirado anteriormente) debajo del diafragma 16 (extremo trasero del tablero) para poder descargar el SPMT del diafragma 12 y así poder retirarlo y continuar con el lanzamiento.

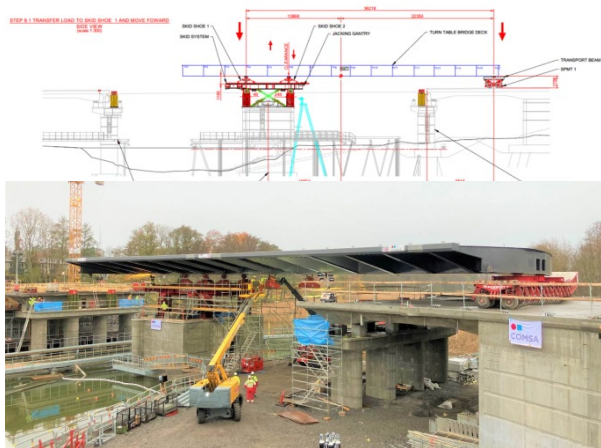


Figura 12. Esquema y foto del lanzamiento con el tablero apoyado en el SPMT situado en su extremo trasero (diafragma 16).

4 ciclos de avance consecutivo de 3.1 m cuyo proceso es idéntico al descrito anteriormente.

Final del lanzamiento: En esta etapa, el SPMT llega hasta la pila 6 y entonces se realiza una transferencia de carga para que todo el tablero quede apoyado en dos parejas de patines situados en la pila 5 (bajo los diafragmas 8 y 9) y se pueda retirar dicho SPMT. A continuación, la última fase de avance se realiza exclusivamente por medio del sistema de deslizamiento sobre patines hasta que el tablero queda situado sobre su posición en los vanos 4 y 5, aunque elevado 4 m sobre el nivel de apoyo final.

2.3 Descenso a su posición final

A continuación tuvo lugar la tercera operación o movimiento del proceso: el descenso del tablero por medio de gatos de trepa. El sistema de gateo en trepa se compone de cilindros hidráulicos de una carrera efectiva de 150 mm, situados cada uno dentro de una carcasa metálica a la que están rígidamente unidos. Esta carcasa proporciona una superficie adicional durante el gateo para poder realizar los apoyos mecánicos necesarios en cada fase y liberar el pistón, permitiendo así al sistema trepar o descender sobre sí mismo.

Para la realización de los descensos, el gato se sitúa sobre un castillete de tacos, bien metálicos en base a perfiles tipo HEB, o bien de madera de alta resistencia, en función de la estabilidad y rigidez del conjunto necesaria en cada maniobra. Los tacos se disponen contrapeados, y se atornillan entre sí en el caso

de los perfiles metálicos. A medida que el cilindro hidráulico finaliza una etapa de descenso, se retira en cada fase una hilera de tacos, para a continuación realizar la siguiente etapa e ir retirando capas del castillete sucesivamente.

La siguiente figura muestra el principio de funcionamiento del sistema en modo descenso.

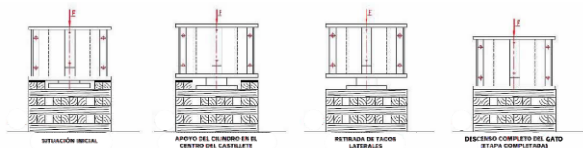


Figura 13. Secuencia de descenso mediante gato de trepa y castillete de tacos de madera.

Tras completar el lanzamiento se ejecutó el descenso en dos fases. En primer lugar, se procedió a descender la estructura temporal de la pila 5 y, con ella, el tablero mediante la operación simultánea de 4 gatos de trepa de 500 t y el desmontaje secuencial de los castilletes metálicos, hasta completar un descenso aproximado de 1900 mm y transferir la carga a los gatos de trepa de 150 t situados en las pilas 4 y 6 (figura 14).



Figura 14. Descenso sobre estructura de pila 5.

A continuación, se procedió al desmontaje completo de la estructura auxiliar de pila, y se completó el gateo final sobre

apoyos definitivos mediante la operación de los gatos de trepa situados en las pilas 4 y 6 (bajo diafragmas 1 y 16), retirando sucesivamente hileras de tacos de madera de alta resistencia, y completando esta vez un descenso de unos 1600 mm (figura 15).

2.4 Ajuste en planta y colocación de apoyos

Cuando faltaban 10 cm para llegar a la cota de apoyos, se ejecuta el ajuste final en planta. Para ello, se apoya provisionalmente el tablero mediante enanos temporales especialmente diseñados, que se sueldan a la cara inferior del tablero, sobre mesas de ajuste dotadas de láminas deslizantes de neopreno zunchado recubiertas de teflón. Sobre estas mesas se actúa mediante 8 gatos hidráulicos horizontales de 30 t de capacidad, hasta situar el puente en planta dentro de los márgenes de tolerancia, con precisión milimétrica (figura 16).



Figura 15. Descenso sobre castilletes de pilas 4 y 6.

La corrección se realizaba coordinando la información de posicionamiento proporcionado por topografía con el accionamiento de los gatos horizontales, hasta alcanzar los recorridos marcados en cada

dirección. Una vez terminado el empuje de corrección, se volvían a controlar topográficamente la posición de las 4 esquinas del tablero, repitiéndose esta secuencia hasta alcanzar la posición final.



Figura 16. Vista de la mesa de ajuste donde se puede observar el enano de apoyo provisional y uno de los gatos horizontales.

Finalmente se realizó un último escalón de descenso hasta llegar a la cota definitiva. El tablero se dejó apoyado sobre unos gatos hidráulicos bloqueados, hasta ejecutar las mesetas de los apoyos definitivos.

3. Adaptación del diseño del puente al proceso constructivo

3.1 Comprobación del vano 6

Durante el proceso de montaje, el tablero metálico se desplazó por encima del vano 6. La carga máxima prevista en dicho vano era de 331 t (presión de 8.1 t/m²) que se podía producir bajo el SPMT delantero durante la primera fase del proceso (operación de traslado).

Se simuló el desplazamiento de dichos carros SPMT por encima del vano 6. Resultó que los esfuerzos debidos al proceso constructivo eran superiores a los esfuerzos de diseño en algunas secciones, por lo que fue necesario reforzar las armaduras.

También se comprobaron el estribo 2 y la pila 6 que no fue necesario reforzar.

3.2 Comprobación del tablero metálico

El proceso constructivo produce distintos esquemas estructurales en el tablero metálico debido al cambio en la posición o sección de los apoyos durante cada una de las etapas del lanzamiento y descenso. Casi todos estos esquemas estructurales son distintos a los esquemas de tablero cerrado y abierto que se habían considerado en el diseño del proyecto constructivo. Resultaba necesario comprobar el tablero metálico para cada una de las etapas provisionales con su correspondiente esquema estático.

Nótese que en cada etapa del proceso el tablero siempre tuvo una configuración de viga biapoyada con voladizos de longitud variable o sin ellos. Por lo tanto, la etapa que causó mayores esfuerzos de flexión se produjo durante la última fase del descenso (tablero biapoyado en sus extremos, en las secciones sobre pila 4 y 6, donde tenía una luz de 43 m). En esta situación, el momento flector sobre la sección “central”, es decir, sobre la pila 5, era igual a $M_{\text{cons}} = g \cdot (2 \cdot L)^2 / 8$ (positivo, tracción en cara inferior).

Por otra parte, el tablero había sido diseñado para resistir su propio peso (y la sobrecarga de nieve) cuando se abriera para el paso de las embarcaciones. En esta situación, el momento en dicha sección vale $M_{\text{abierto}} = -g \cdot L^2 / 2$.

Por lo tanto, $M_{\text{cons}} = -M_{\text{abierto}}$

El análisis estructural confirmó que no era necesario el refuerzo de las secciones del tablero metálico a causa del proceso constructivo.

Sin embargo, sí fue necesario hacer un refuerzo local en aquellos diafragmas intermedios que durante el proceso constructivo debían ejercer provisionalmente de diafragma de apoyo (sobre patines o sobre SPMT). Por un lado, la magnitud de las

reacciones en algunas de estas fases superaba la resistencia local de los diafragmas y almas del cajón metálico. Por otro lado, la posición de los apoyos provisionales tenía una excentricidad variable y no despreciable debido a que el lanzamiento del tablero seguía una trayectoria recta, pero el trazado del tablero es curvo.

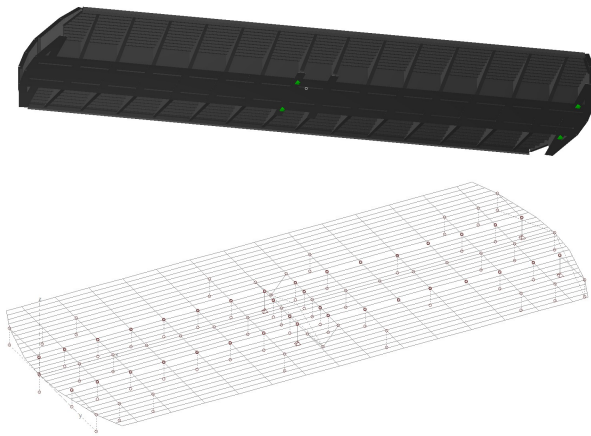


Figura 17. Modelo del tablero metálico tipo emparrillado.

Como es habitual en el lanzamiento de tableros metálicos, se comprobó la abolladura local o patch-loading. Esta comprobación se hizo mediante un modelo de elementos finitos porque la geometría de diafragmas y almas del cajón difería de la prevista en la formulación de la normativa debido a la excentricidad de los apoyos provisionales.

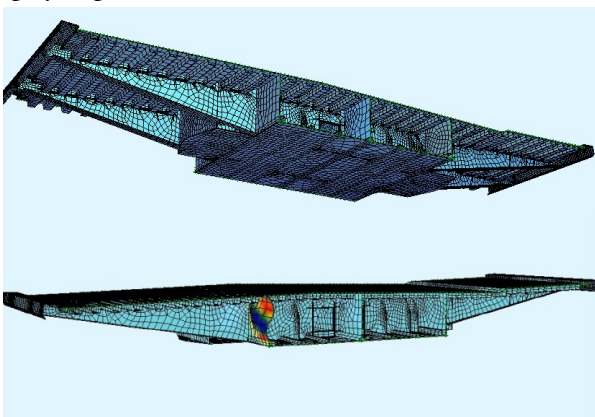


Figura 18. Modelos de EF para cálculo de la carga crítica de patch-loading en los diafragmas.

En consecuencia, la carga crítica de abolladura se obtuvo a partir de un análisis elástico-lineal en el modelo de elementos finitos, aunque la carga última se calculó con la

formulación del eurocódigo [1] [2] a partir de dicha carga crítica.

De este modo se definieron los refuerzos necesarios en los diafragmas intermedios que eran de apoyo durante el proceso constructivo, para garantizar que no se producirían fenómenos de inestabilidades locales de chapas en ninguna de las fases del lanzamiento del tablero.

4. Control del lanzamiento

Las variables monitorizadas durante el proceso constructivo fueron las siguientes:

Posición del tablero. Durante todo el proceso constructivo se realizó un control topográfico de la posición del tablero. En la primera etapa de traslación, el trayecto de los SPMT debía seguir el recorrido previsto sobre el vano 6. Al final de esta etapa, el tablero debía quedar alineado con la línea rectilínea del lanzamiento, al final del cual, el tablero debía alcanzar su posición final en planta. Nótese que el único elemento de guiado durante el lanzamiento eran los carriles de los patines situados en la pila 5, pero que los SPMT podían desviar la trayectoria de dicho lanzamiento.

Reacciones y deformaciones. Tanto los SPMT como los patines permitían monitorizar de manera continua la reacción en cada línea de apoyos. Las deformaciones se midieron con instrumentos topográficos en secciones de control que variaban en cada etapa del lanzamiento. Conviene apuntar que los modelos de cálculo proporcionan fuerzas de reacción precisas debido al esquema estático de viga biapoyada (reacciones estáticamente determinadas) que se mantenía en todas las etapas del proceso constructivo. Sin embargo, los mismos modelos del tablero, que eran modelos de emparrillado plano, podían proporcionar deformaciones imprecisas debido al arrastre por cortante. En relación con este fenómeno hay que destacar que la inercia de las secciones se redujo según al ancho eficaz, pero

que una misma sección tenía un ancho eficaz distinto en cada etapa constructiva debido al cambio en la posición de los apoyos.

Se realizó una prueba de carga antes del inicio del proceso constructivo. En ella se reprodujeron las etapas más críticas del lanzamiento. Además, dicha prueba permitió calibrar las deformaciones de los modelos de cálculo.

Como variables climatológicas se midieron el viento y la temperatura ambiental, así como el gradiente térmico en el tablero.

Agradecimientos

Agradecemos la confianza de Trafikverket (Administración de transporte de Suecia) por la confianza depositada en Comsa Corporación para llevar a cabo esta obra.

Ninguna obra puede llegar a buen puerto sin un buen equipo de profesionales, en este caso compañeros de los equipos de obra de Comsa Corporación y Mammoet. Dichos equipos fueron liderados por Fran García Martínez, por parte de Comsa y Manuel Moreno, por parte de Mammoet. Ambos contaron con la colaboración del equipo de Tecade, taller del tablero metálico, liderado por Lorenzo Herrera.

Referencias

- [1] European Committee for standardization, EN 1993-1-5 Plated structural elements.
- [2] J. Pascual, T. Ripa, Design improvements for patch-loading resistance in bridges during launching, Steelbridge conference (2004)