

Tiller Øst, dos nuevos puentes integrales peatonales en Trondheim, Noruega

Tiller Øst, two new integral footbridges in Trondheim, Norway

Sergio Albero Chacón^a, Alberto Ordiñana Gil^b y Fernando Ibáñez Climent^c

^a MSc ICCP and PMP®. Degree of Freedom. Senior Engineer. s.albero@dofengineers.com

^b MSc ICCP. Degree of Freedom. Engineer. a.ordinana@dofengineers.com

^c MSc ICCP. Degree of Freedom. Director. f.ibanez@dofengineers.com

RESUMEN

En 2018 se construyeron dos puentes integrales peatonales en Trondheim, Noruega, uno de ellos construido en hormigón armado in situ y el otro con tablero prefabricado de hormigón postesado. Esta tipología está poco extendida en España, pero es muy habitual en otros países europeos. Degree of Freedom desarrolló el diseño de detalle en la fase de ejecución del contrato de proyecto y construcción entre el Ayuntamiento y Søbstad, un contratista local. En este texto se describen las características principales de ambos puentes, así como ciertos aspectos constructivos que peculiarizan su diseño.

ABSTRACT

In 2018 two integral footbridges were constructed in Trondheim, Norway, one in-situ concrete and the other with a precast, post-tensioned concrete deck. Although this bridge type is not common in Spain it is widely used in other European countries. Degree of Freedom developed the detail design for the construction phase of a design and build contract between the municipality and Søbstad, a local contractor. This paper describes the main features of both bridges, as well as some construction aspects which determined their final design.

PALABRAS CLAVE: puente, integral, pasarela, peatonal, Noruega, hormigón, postesado, poliestireno.

KEYWORDS: bridge, integral, footbridge, pedestrian, Norway, concrete, post-tensioned, polystyrene.

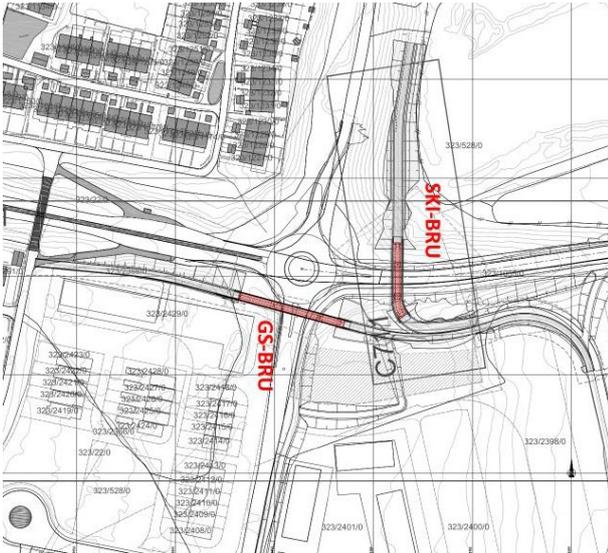
1. Introducción

Con el objeto de desarrollar el nuevo distrito de Tiller Øst (Tiller Este), el Ayuntamiento de Trondheim, Noruega, encargó en 2016 el proyecto preliminar de una nueva vía para peatones y ciclistas que cruzara la carretera Harald Torps, junto con otra vía esquiable que cruzara la carretera John Aaes (Figura 1).

En este proyecto se definió la tipología y geometría general de dos nuevos puentes, uno

para peatones y ciclistas (GS-bru) y otro esquiable (Skibru), que se iban a localizar en las inmediaciones de la intersección entre las citadas carreteras.

A la constructora local Søbstad AS le adjudicaron el contrato de proyecto y construcción de los puentes más los tramos de vías peatonales y otras tareas de paisajismo. La obra se completó entre los años 2017 y 2018.



Un equipo de ingenieros civiles españoles y noruegos se encargó de desarrollar el diseño de detalle de los puentes del proyecto constructivo,

bajo la premisa de respetar la tipología y geometrías definidas en el proyecto preliminar proporcionado por el ayuntamiento.

Por otro lado, el equipo también realizó la función de asistencia técnica al contratista, implementando diferentes modificaciones al proyecto y resolviendo incidencias de obra, algunas de ellas de relevancia como se podrá ver más adelante.

2. Skibru

El puente sobre la carretera John Aaes se diseña para el tránsito de esquiadores. Esta tipología de pasos es común en Noruega, y consiste en incorporar una capa de nieve compactada que permanecerá helada durante los meses invernales.

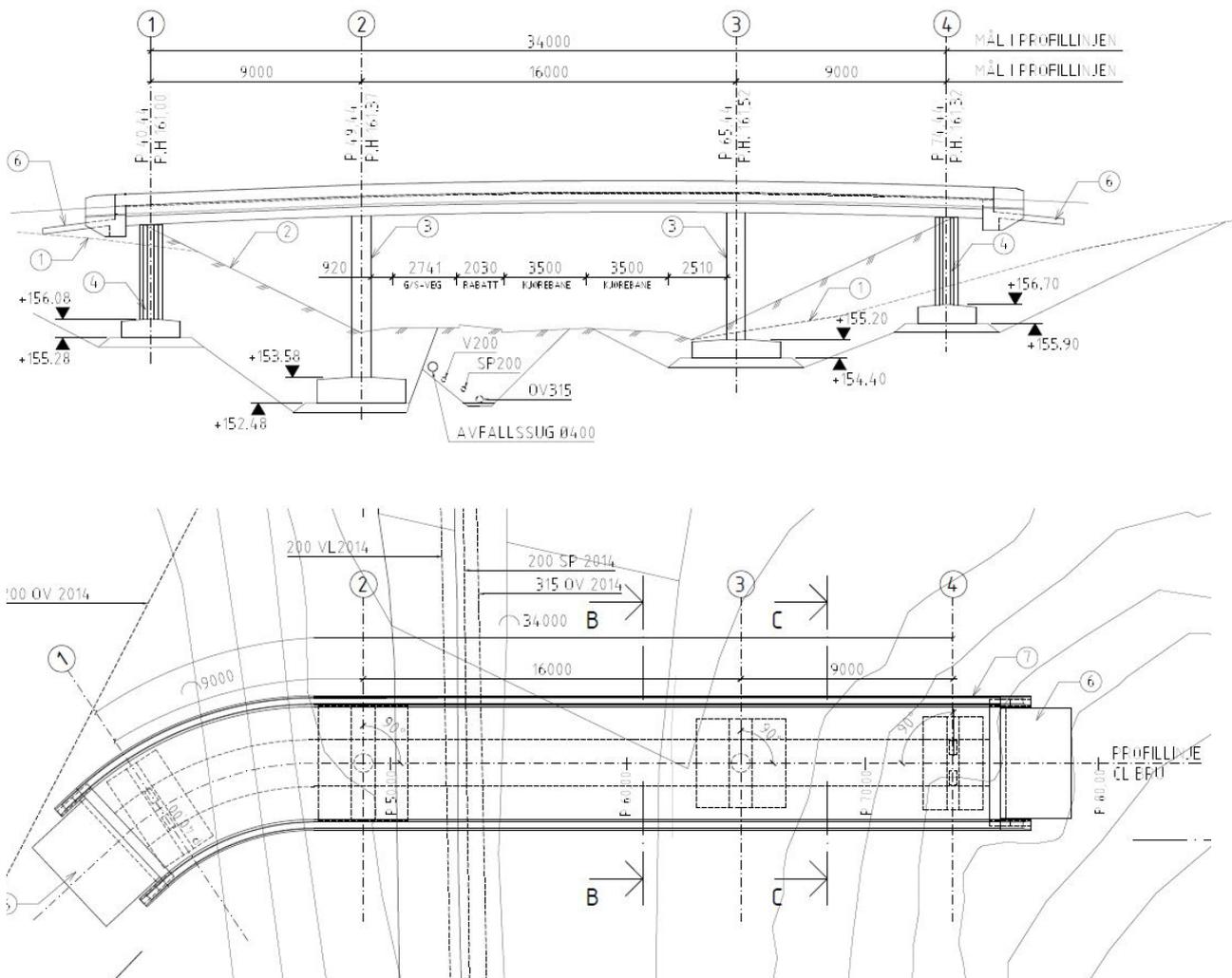


Figura 2. Planta y alzado del Skibru.

2.1. Geometría, materiales y acciones

El Skibru es un puente integral de hormigón armado ejecutado in situ (Figura 9). Esto es, un puente en el que el tablero está empotrado a las pilas y estribos, y que prescinde de aparatos de apoyo y juntas.

2.1.1. Tablero

El tablero es continuo, de 34m de longitud con tres vanos (9m+16m+9m) más tramos volado de 2.25m en cada extremo (Figura 2). Fue construido mediante cimbra cuajada

De los tramos volados arrancan pequeñas aletas en vuelta y se apoyan las losas de transición de 3.10m de largo.

La planta del vano del extremo sur es curva ($R=12m$), siendo recta en el resto de los vanos. Respecto al alzado, se ha usado un acuerdo vertical circular ($R=400m$).

La sección del tablero es de tipo losa, de 5.6m de ancho y canto de 800mm ($L_{m\acute{a}x}/20$).

2.1.2. Pilas y cimentación

Las pilas centrales 2 y 3 son de 7 y 5.5m de altura y tienen un fuste de sección circular ($\varnothing=800mm$) (Figura 3).

Las pilas extremas 1 y 4 (Figura 4), de 4m de altura, se diseñan para que sean esbeltas en la dirección longitudinal e incrementar su flexibilidad. Cada una tiene dos fustes de sección rectangular (600mm x 300mm). Al estar ubicadas dentro de los terraplenes de aproximación hacen la función de estribos abiertos.

A pesar de que en puentes integrales es típico el uso de pilotes en una sola hilera [2], la cimentación de las pilas que fue definida por los ingenieros geotécnicos, en base a los sondeos realizados, es de tipo superficial. Son zapatas rectangulares cimentadas en arenas finas/medias compactas sin presencia de nivel freático [3]. La interacción suelo-zapatas se tuvo en cuenta en el diseño mediante la formulación de asientos

elásticos en zapatas rígidas de Boussinesq, igual a la que se propone en la Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera [4].

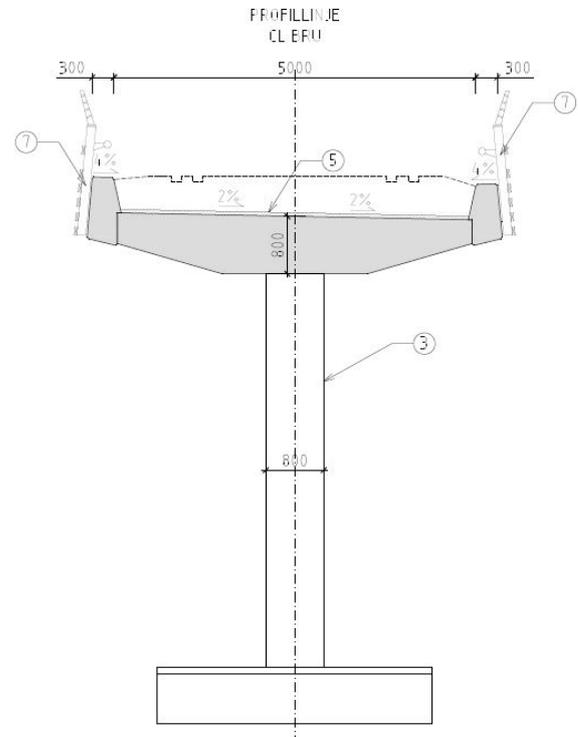
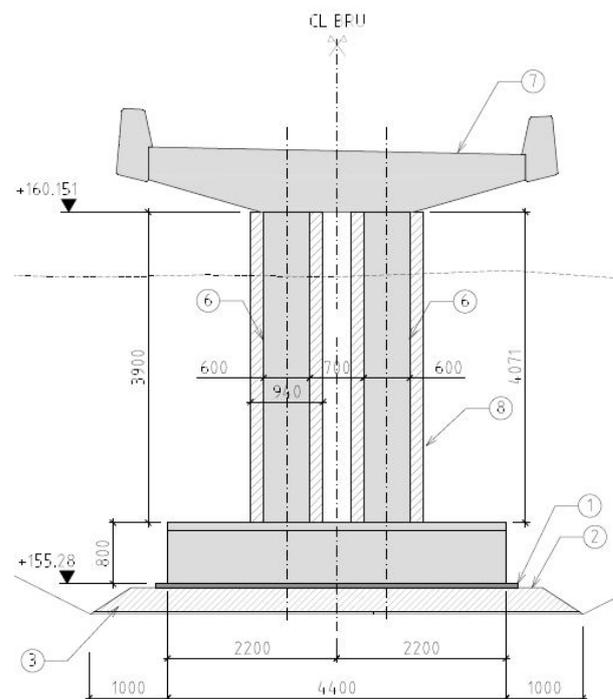


Figura 3. Sección en pila central del Skibru.



Los fustes de las pilas extremas originalmente se diseñaron protegidos por tubos prefabricados de hormigón en masa ($\varnothing_{int}=800\text{mm}$), del mismo tipo que los que se usan para los colectores. Su objeto era: en primer lugar, independizar a los fustes de los empujes del terraplén; en segundo, permitir el movimiento de las pilas ante las deformaciones del tablero sin la coacción del relleno; y finalmente, simplificar el diseño del puente. El aspecto de la capacidad de deformación de las pilas extremas es muy relevante, ya que son las que mayores movimientos sufren.

No obstante, hubo una incidencia en obra y no se colocaron los tubos previamente a la ejecución del tablero. Con lo que, para conseguir la deformabilidad deseada en las pilas, se optó por forrar los fustes con planchas de poliestireno expandido de 340mm de espesor (EPS de 80 kPa de resistencia mínima a la compresión para fluencia del 10%) (Figura 5). El poliestireno, en función de su densidad, es bastante deformable frente a cargas de compresión, por lo que esta solución facilitará los movimientos de la pila en contacto con el relleno, mucho más rígido que el forro.

Para el dimensionado del forro se modificó de forma iterativa el modelo cálculo del puente, al que se le incorporó el empuje de terraplenes en las pilas extremas y en sus fustes se distribuyeron muelles horizontales elásticos en ambas direcciones. La rigidez se compuso como dos muelles en serie, el módulo de balasto del relleno obtenido mediante los ábacos de Chadeisson (K_{h_soil}), y el módulo de elasticidad aproximada del porexpán para una deformación del 2% (K_{h_EPS}):

$$K_h = \frac{K_{h_soil} \cdot K_{h_EPS}}{K_{h_soil} + K_{h_EPS}} \quad (1)$$

Las variables con las que se podía iterar eran el espesor del forro, así como la rigidez al 2% del poliestireno expandido. La solución elegida proporcionó resultados de esfuerzos capaces de ser resistidos con los armados ya

dispuestos en el puente, con la condición de que las presiones sobre el porexpán a corto plazo (reacciones en ELU) y a largo plazo (reacciones en ELS casipermanente), no superasen las resistencias a compresión al 10% de deformación y a 2% respectivamente.

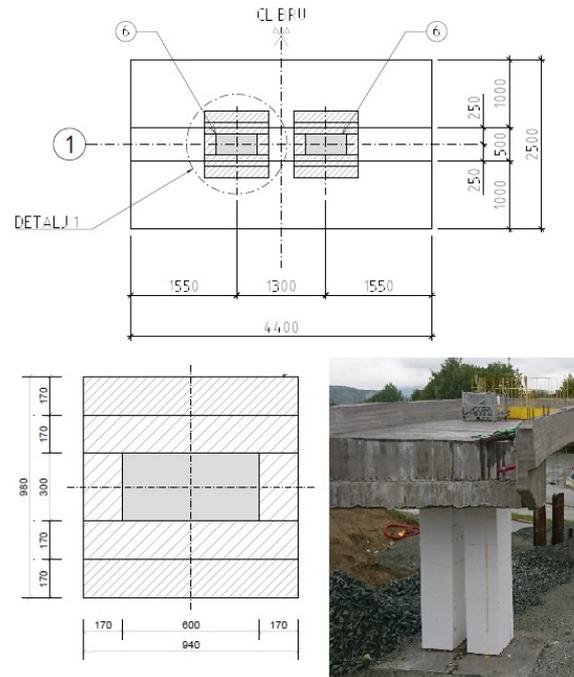


Figura 5. Detalle de forro de porexpán del Skibru.

2.1.3. Materiales

El hormigón usado es C45 ($f_{ck}=45\text{MPa}$), y el acero de refuerzos es B500NC ($f_{yk}=500\text{MPa}$).

Noruega tiene un clima muy frío y es frecuente el uso de sales fundentes, por lo que en el manual de diseño de puentes de la administración de carreteras noruega [1] es preceptiva la utilización de este hormigón de elevada resistencia. También lo es el empleo de grandes recubrimientos en armaduras ($c_{nom}=75\pm 15\text{mm}$). Este último condicionante penalizó significativamente a la hora de diseñar el armado frente al ELS de fisuración.

2.1.4. Acciones

2.2. Análisis y resultados

A partir de un sencillo modelo de barras elástico lineal (Figura 6) se realizaron las verificaciones y diseño de armados del puente para situaciones en ELU (Figura 7 y Figura 8).

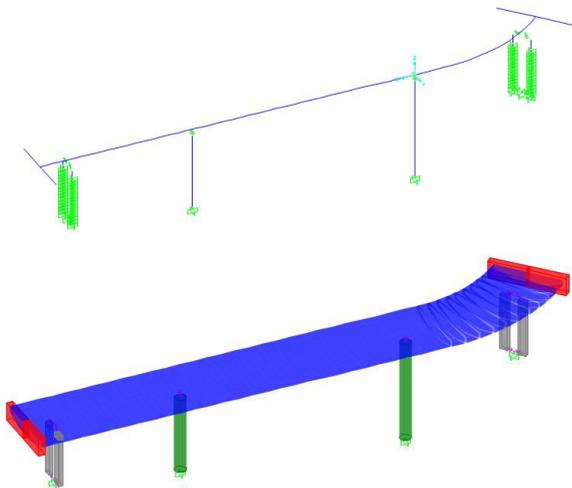
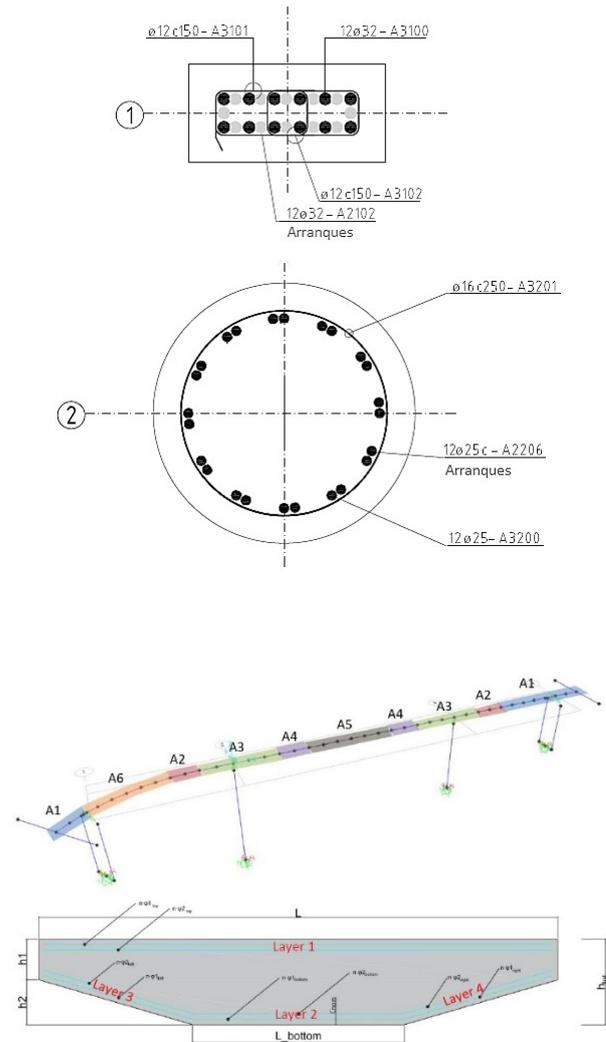


Figura 6. Modelo FEM del Skibru.

También los ELS de fisuración y deformaciones. Se obtuvo la flecha máxima en el tablero, de $17\text{mm} < L/350 = 45\text{mm}$ en combinaciones frecuentes [5] y no fue necesaria dar contraflecha; y de $2\text{mm} < L/350 = 45\text{mm}$ debido a la acción característica de tráfico [3].

El ELS de vibraciones se verificó con un cálculo modal, donde las frecuencias fundamentales vertical y lateral quedaron holgadamente por encima de los límites de confort de 5Hz y 2.5Hz respectivamente. Esta verificación se llevó a cabo tanto con la carga de la capa de nieve compactada, como sin ella.



LAYER	Reinforcement Section A3	Reinforcement Section A5
LAYER 1	2Φ25 / 150	Φ25 / 150
LAYER 2	Φ25 / 150	2Φ25 / 150
LAYER 3	Φ25 / 150	2Φ25 / 150
LAYER 4	Φ25 / 150	2Φ25 / 150
Shear vertical	6Φ12/200	2Φ12/200
Transversal	Φ20/150	Φ20/150

Figura 8. Armados del tablero del Skibru.



Por cortesía de Søbstad AS.

3. GS-bru

El puente sobre la vía Harald Torps (Figura 17) es para uso peatonal y de ciclistas, lo que en terminología noruega se denominaría GS-bru (Gang- og sikkelbru).

3.1. Geometría, materiales y acciones

El GS-bru es un puente semi-integral que, a diferencia del Skibru, es de hormigón postesado ya que la luz del vano central (24m) sería excesiva para el rango de uso del hormigón armado.

Es probable que el ingeniero que realizó el proyecto preliminar de este puente tomara la decisión de no diseñarlo completamente integral por dos motivos: El primero, porque al ser postesado las deformaciones en el tablero originadas por la fluencia, junto a la retracción y las acciones térmicas, serían difícilmente asimilables por los pilares extremos [2]. En segundo lugar, porque el paso de un sendero

bajo el vano oeste impedía la formación de un talud, necesitando un estribo con muro frontal de paramento vertical. Este muro resultaría demasiado rígido para un diseño integral.

Con el diseño semi-integral decidido se optó por el empleo de dos apoyos tipo POT deslizantes en el estribo.

3.1.1. Tablero

El tablero es continuo, de 46m de longitud y tres vanos (11m+24m+11m), más un pequeño tramo volado de 1.8m al este (Figura 10).

A diferencia del Skibru, la planta del GS-bru es básicamente recta. El trazado vertical sigue un acuerdo circular (R=200m).

La sección transversal es también de tipo losa, con 4.2m de ancho y canto de 820mm ($L_{\text{máx}}/30$).

El postesado consiste en 4 tendones de 16 cordones Ø0.6" Y1860S7, tesando los dos tendones centrales por un extremo, y los laterales desde el otro. El sistema de postesado usado es CONA CMI BT.

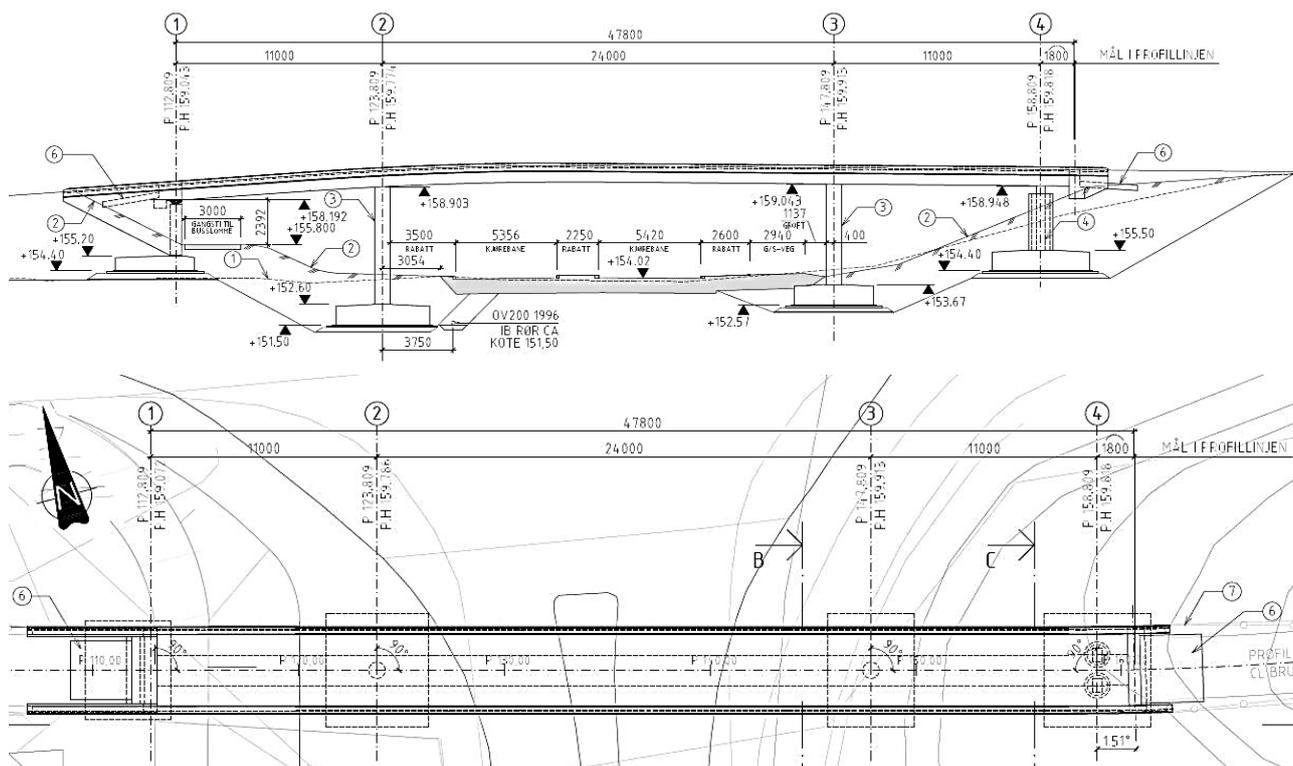


Figura 10. Planta y alzado del GS-bru.

A ambos extremos del tablero van las aletas en vuelta y vigas transversales donde apoyan las losas de transición. Estos elementos se hormigonan monolíticamente al tablero después de ser colocado y postesado.

Anecdóticamente, se llegó a finalizar el diseño del puente para ser ejecutado in situ mediante cimbra. No obstante, por motivos de seguridad para tráfico rodado y los operarios, la Propiedad decidió su prefabricación en los alrededores de la obra. Esta decisión incrementó la complejidad del diseño por diversos motivos:

- Por la incorporación de nuevas fases constructivas. Transporte y apeo del tablero como elemento de hormigón armado, antes de ser postesado.

- Por la necesidad de dejar previstos grandes orificios provisionales del tamaño de la sección de pilas y hormigonar a posteriori su unión (Figura 12). Para facilitar la ejecución del empotramiento y reducir la longitud de las esperas en coronación de pilares, se sustituyeron estas por barras corrugadas terminadas en placa.

3.1.2. Estribo, pilas y cimentación

El estribo del eje 1 está formado por un muro frontal sin aletas, de 2.70m de alto, 3.26m de ancho y 600mm de espesor (Figura 13).

Los 2 aparatos de apoyo son de tipo POT. El apoyo sur tiene el movimiento longitudinal libre y el norte es multidireccional. Se instalaron sobre sendos recercados de hormigón armado, dispuestos para cumplir con el espacio mínimo exigido por los manuales noruegos [1] en caso de gateo (200mm).

Las pilas centrales 2 y 3 son de 6.3 y 5.3m de altura respectivamente, y tienen un fuste de sección circular ($\varnothing=800\text{mm}$).

Con un formato similar al Skibru, la pila 4, de 3.4m de altura, es esbelta y más flexible que el resto. Los dos fustes son de sección rectangular (650mm x 450mm). Pero en este caso, a

diferencia del Skibru, sí que se envolvieron los fustes con tubos prefabricados de hormigón en masa ($\varnothing_{\text{int}}=1000\text{mm}$ y espesor 125mm) (Figura 11). Las ventajas que entraña su uso en la deformabilidad de la pila extrema ya han sido descritas.



Figura 11. Imagen de pila 4 del GS-bru con tubos de hormigón. Por cortesía de Søbstad AS.

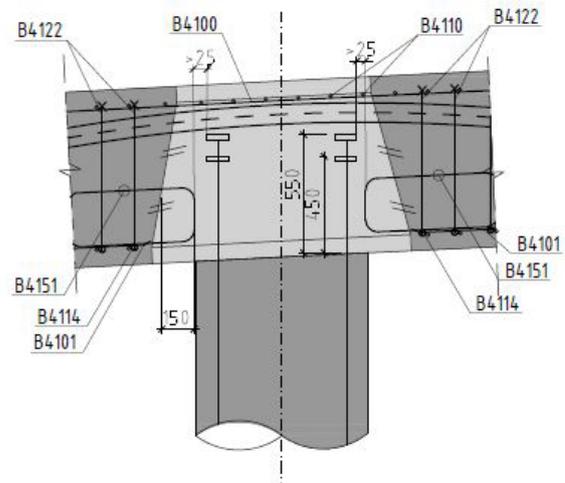


Figura 12. Detalle del empotramiento en pila 2 del GS-bru con hormigón de 2ª fase.

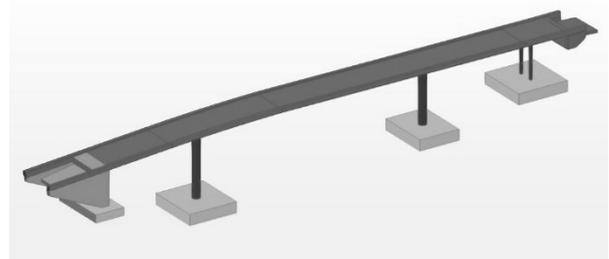


Figura 13. Modelo TEKLA del GS-bru (Usado para la generación de planos y planillas de armados).

Al igual que en el Skibru, la cimentación prescrita por los ingenieros geotécnicos fue de tipo superficial sobre terreno arenoso compacto, por lo que también se utilizó el mismo modelo elástico de interacción suelo-estructura.

3.1.3. Materiales

Como en el Skibru, el hormigón usado es C45 ($f_{ck}=45\text{MPa}$) y refuerzos de armado B500NC ($f_{yk}=500\text{MPa}$). El acero para postesado es Y1860S7.

3.1.4. Proceso constructivo y transporte del tablero

De forma sucinta, el proceso constructivo fue:

- Fabricación del tablero con cimbra en los alrededores de la obra.
- Construcción de estribo y pilas.
- Transporte del tablero hasta su posición definitiva y apeo sobre puntales próximos a las pilas y estribo.
- Hormigonado de empotramientos de cabeza de pilas en tablero.
- Retirada de puntales.

- Ejecución de aletas y terraplenes.
- Postesado.
- Ejecución de losas de transición.
- Pavimento y acabados.

La operación más compleja y delicada fue el transporte y elevación del tablero, de 334Tn de peso, a su posición final con apeo. Fue ejecutada en una sola noche, mediante 4 transportes especiales de 6 ejes y movimiento sincronizado. Cada uno disponía de dos torres de elevación con gatos hidráulicos (Figura 14).

3.1.5. Acciones

Las acciones más relevantes a nivel de deformaciones longitudinales del tablero son las mismas que en las del Skibru, retracción y temperatura, con la salvedad de que en este caso el postesado genera acortamientos por fluencia con $\varphi(t^{\infty},28)=1.23$.

El movimiento longitudinal máximo obtenido para el diseño de los apoyos POT fue de 52mm.

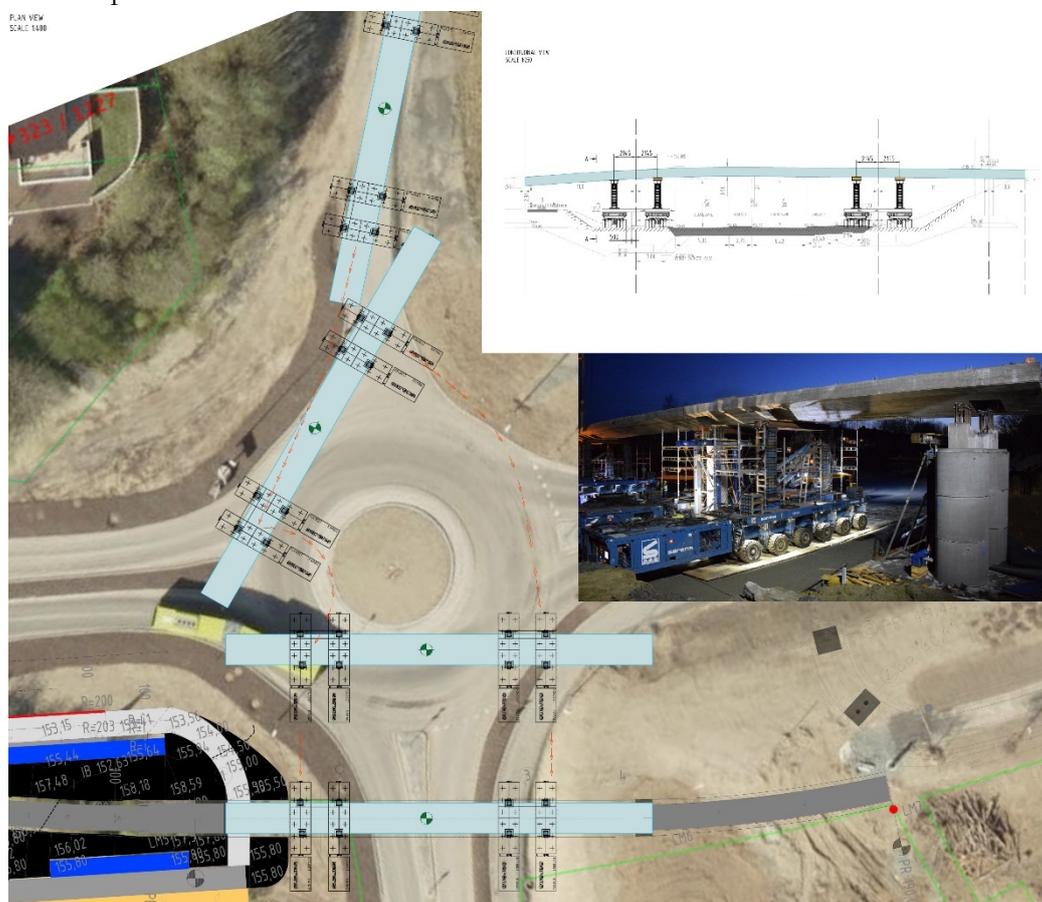


Figura 14. Transporte del tablero del GS-bru. Imagen del transporte especial por cortesía de Søbstad AS.

La acción de peso propio del tablero adquiere también especial relevancia para el diseño de las armaduras pasivas en las dos situaciones transitorias sin postesado: El transporte y apeo del tablero. La primera, por los importantes momentos negativos en voladizos, y la otra por los positivos del vano central.

3.2. Análisis y resultados

3.2.1. Modelo de cálculo

El modelo usado en el diseño del GS-bru es de elementos finitos tipo barra para tablero y pilas, y tipo placa en estribo y aletas del eje 1 (Figura 15). Los análisis que se llevaron a cabo fueron:

- Análisis estático de segundo orden, con las acciones y elementos estructurales presentes en todas las fases constructivas. Se consideraron las propiedades del hormigón dependientes del tiempo y la interacción suelo-estructura.
- Análisis modal para el estudio de frecuencias fundamentales de vibración, y análisis dinámico tipo "Time-History" para la obtención de las aceleraciones del tablero por el paso de peatones [6].

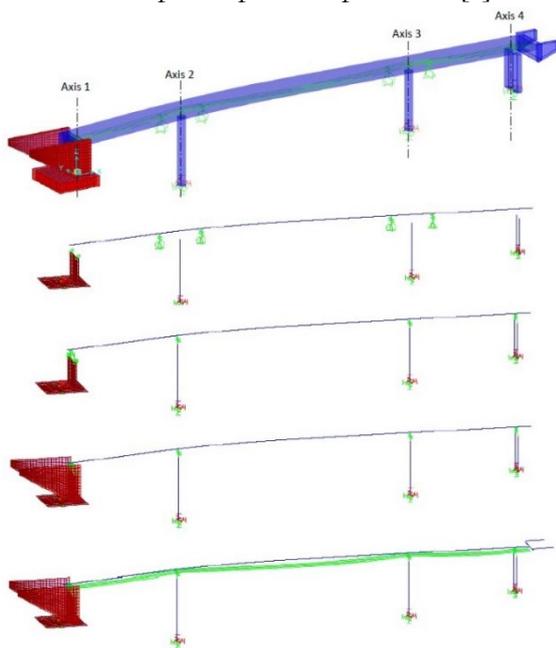


Figura 15. Modelo FEM del GS-bru con sus fases.

3.2.2. Resultados

Se verificaron los ELU con los resultados de envolventes de todas las fases del modelo. De entre todos los resultados destaca los elevados armados pasivos del tablero, provocados por la fase de transporte, lo cual muestra del proceso constructivo elegido por la Propiedad no ha resultado económico (Figura 16).

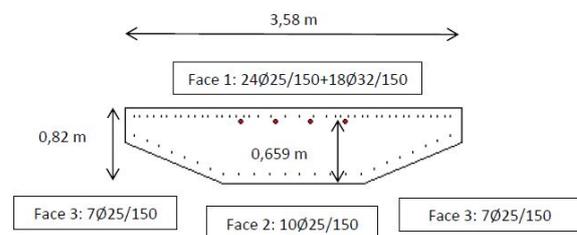


Figura 16. Croquis de armado de tablero de GS-bru en pila central sin postesado.

Las pérdidas totales de pretensado se sitúan en torno al 20%.

Respecto a los ELS, se verificó que no hubiera descompresiones en el tablero después del postesado ($\sigma_{\text{cmin}}=0.3\text{MPa}$), ni compresiones elevadas ($\sigma_{\text{cmax}}=12\text{MPa}<0.6f_{\text{ck}}=27\text{MPa}$). La flecha máxima a largo plazo es de $22\text{mm}<L/350=68\text{mm}$ [5].

Por otro lado, aunque se podía intuir por las bajas deformaciones que el puente no daría problemas de vibraciones, el cálculo modal mostró que la frecuencia fundamental vertical quedaba por debajo del límite del 5 Hz [5]. Así pues, se llevó a cabo un cálculo dinámico siguiendo las prescripciones del Anejo Nacional británico del Eurocódigo 0 [6], ya que el noruego [5] no da directrices para calcular las aceleraciones del tablero por tráfico peatonal. El resultado del análisis confirmó las bajas aceleraciones verticales ya intuitas ($< 0.7\text{m/s}^2$ [5]): 0.11m/s^2 caminando; 0.06m/s^2 corriendo; 0.09m/s^2 en aglomeración.



Figura 17. Imagen del GS-bru prácticamente terminado. Cortesía de Søbstad AS.

4. Conclusiones

Los puentes peatonales sobre las calles Harald Torps y John Aaes son dos ejemplos de puentes integrales y semi-integrales que se construyen en Noruega. Con este artículo se pretende aportar suficiente información para animar a los ingenieros españoles a diseñar puentes de esta tipología.

Agradecimientos

En primer lugar, nuestro mayor agradecimiento a Søbstad AS, que nos ha cedido amablemente las imágenes incorporadas a este artículo.

También agradecerles a nuestros colegas de Oslo, Birger Opgård y Felice Allievi, el que compartieran con el equipo de Valencia su amplia experiencia en proyectos noruegos.

Referencias

- [1] Statens Vegvesen, Håndbok N400 Bruprosjektering, 2015.
- [2] Statens Vegvesen, Håndbok N400 Bruprosjektering, 2015.
- [3] Statens Vegvesen, Håndbok V220 Geoteknikk i vegbygging (2010).
- [4] Ministerio de Fomento, Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera (2009).
- [5] Standard Norge, NS-EN 1990:2002 +NA:2008/A1:2005+NA:2010 – Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner
- [6] BSI British Standards, National Annex to BS EN 1990: 2002+A1:2005 Eurocode basis of structural design