

Puentes mixtos en la E6RV en Noruega

Composite Bridges on the E6RV in Norway

José María Arroyo Barbat^a, Alberto Gabarrón Durán^b,

José María Hernández Aranda^c, Francisco Javier Carrascal Pérez^d,

Francisco Javier Martínez López^e y Manuel Biedma García^f

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyectos. imarroyob@acciona.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyectos. algabarron@acciona.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyectos. jmhernandez@acciona.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyectos. franciscojavier.carrascal.perez@acciona.com

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyectos. franciscojavier.martinez.lopez@acciona.com

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe Dto. Estructuras Metálicas. manuel.biedma.garcia@acciona.com

RESUMEN

Acciona Ingeniería ha diseñado tres puentes de carretera que forman parte del proyecto de la autopista E6RV en Noruega, realizado con metodología BIM. El contratista principal ha sido Acciona Construcción. Los tres puentes presentan similitudes entre sí: tablero mixto hormigón-acero continuo de múltiples vanos, biáxeno, simple acción mixta, apoyado en pilas de hormigón, trazado curvo en planta y puesta en obra mediante lanzamiento. Los tres presentan las peculiaridades de la forma noruega de entender el diseño de los puentes de carretera: desde la elección de materiales a la configuración de las juntas de dilatación del tablero, pasando por la tipología de los estribos.

ABSTRACT

Acciona Engineering has designed three road bridges that are part of the E6RV highway project in Norway, executed using BIM methodology. The main contractor was Acciona Construction. The three bridges share similarities: continuous composite concrete-steel deck with multiple spans, twin-girder system, simple composite action, supported by concrete piers, with curved alignments in plan, and constructed by launching. They all exhibit the distinct Norwegian approach to road bridge design, from the choice of materials to the configuration of the deck expansion joints, including the type of abutments used.

PALABRAS CLAVE: diseño y construcción, puente mixto, lanzamiento, modelo 3D, BIM.

KEYWORDS: design and build, composite bridge, launching, 3D model, BIM.

1. Introducción

Acciona Ingeniería ha diseñado tres puentes de carretera que forman parte del proyecto de la autopista E6RV en Noruega, realizado íntegramente con metodología BIM. El

contratista principal ha sido *Acciona Construction Norway*, trabajando en colaboración con el organismo estatal noruego *Nye Veier*.

El contrato adjudicado es de tipo *diseño y construcción*, y su objeto principal es el desarrollo de un tramo de 23 km de autopista de 4 carriles.

Actualmente este tramo de autopista consta de dos carriles, de forma que el proyecto desdobra y aumenta la capacidad de ésta, mejorando la seguridad y la eficiencia de la infraestructura existente, y dotando al producto resultante de los estándares de calidad adecuados mientras se minimiza el impacto de la

construcción y explotación futura sobre el medio ambiente.

El tramo de carretera conecta las poblaciones de Ranheim y Værnes y se divide en 15 km de carretera a cielo abierto y 8 km de túneles dobles, algunos de los cuales son de nueva construcción y otros se rehabilitan. Ver figura 1. Su diseño ha sido realizado por Acciona Ingeniería en colaboración con *Ramboll Norway* bajo la fórmula *design joint venture (DJV)*.

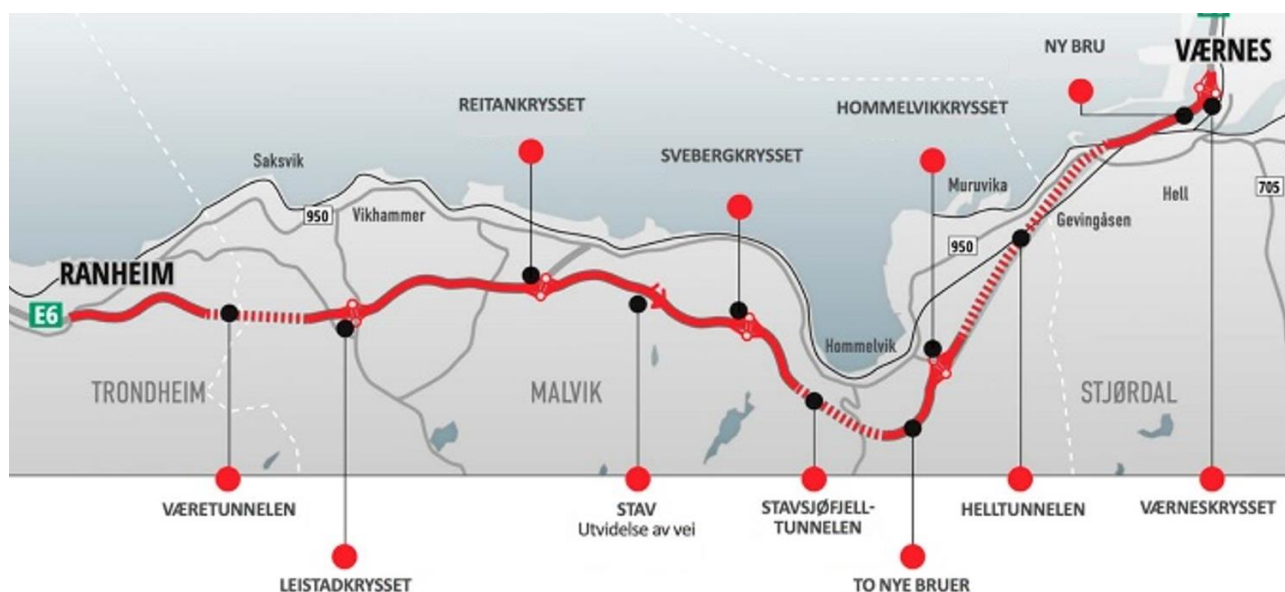


Figura 1. Situación general del tramo proyectado.

Entre los elementos diseñados destacan tres puentes, presentando similitudes entre sí: tablero mixto hormigón-acero continuo de múltiples vanos, biáxeno, simple acción mixta, apoyado en pilas de hormigón, trazado curvo en planta y puesta en obra mediante lanzamiento.

A la fecha de redacción del presente artículo únicamente el primero de los puentes, el denominado *K62 Hommelvikbru Sørgående*, está en ejecución, estando los otros dos puentes en fase de diseño. A mediados de enero de 2025 está previsto el comienzo de la maniobra de lanzamiento del tablero metálico, habiendo sido totalmente manufacturado en las instalaciones de los *Talleres Centrales de Acciona Construcción* en San Sebastián de los Reyes (Madrid).

Este artículo se centra en este puente, representativo de los otros dos dados las similitudes entre ellos, si bien se darán algunas pinceladas adicionales.

Destacamos el hecho de que la DJV fue galardonada con el *Special Recognition* de los *Tekla Global BIM Awards* del año 2022 por el diseño basado en modelos de estos puentes.

2. Condicionantes administrativos y técnicos noruegos

2.1 Flujo del diseño

Noruega hace años que incorporó el diseño de puentes basado en modelos, esto es, haciendo uso de la metodología BIM.

Respecto de los proyectos de puentes de carretera en Noruega bajo el formato *diseño y obra*, estos han de pasar por una serie de fases denominadas 30%, 60%, 100% e IFC. Las dos primeras fases requieren aprobación previa por parte de la autoridad noruega competente en carreteras (Statens Vegvesen, o SVV) antes de avanzar a las siguientes. La fase 30% consta de un único plano como entregable, así como de una reunión personal, en el que se recogen características básicas preliminares del puente diseñado: trazado de la carretera, dimensiones anticipadas, posición de pilas y estribos, ubicación y tipo de juntas de dilatación, tipología del tablero, ancho del mismo, cotas de cimentación, características del terreno sobre el que cimentar, códigos normativos empleados, materiales previstos, sistema de protección contra la corrosión, cargas, nivel de contención de las barreras, sistema de drenaje longitudinal, ubicación de las instalaciones que circularán a lo largo del tablero, gálibos respecto de otras vías de comunicación, etc.

El objetivo buscado por SVV en esta fase es, fundamentalmente, mantener el control sobre el coste de mantenimiento futuro que será necesario en el puente a lo largo de su vida útil.

La fase 60% es prácticamente el equivalente a lo que en España es un proyecto constructivo perfectamente definido y detallado. SVV realiza una exigente supervisión técnica en esta fase cuya intensidad es función de la importancia del puente diseñado.

Una vez aprobada la fase 60%, los dos últimos estadios son apenas meras formalidades.

La cantidad de códigos normativos que rigen el proyecto estructural y la ejecución de puentes de carreteras en Noruega no es especialmente extensa y es fácilmente manejable pues se limita a la colección de Eurocódigos [1], a sus respectivos documentos nacionales de aplicación noruegos [2], a alguna nota técnica ministerial (NA-rundskriv) [3] y a una colección de manuales (Håndbøker) [4] entre los que destacan el N400 [5] (diseño estructural de

puentes de carreteras) y el R762 [6] (pliego de condiciones técnicas).

Entre los condicionantes técnico-administrativos noruegos más significativos destacamos por su excepcional importancia la búsqueda permanente de la minimización de los costes futuros de mantenimiento. Este criterio noruego está presente desde la concepción estructural del puente (fase 30%), y se articula en diferentes aspectos, tales como la eliminación dentro de lo razonable de las juntas de dilatación, la tipología de las mismas, los dos únicos sistemas de protección contra la corrosión que se admiten en las superficies expuestas de acero al carbono estructural, la tipología sin junta de los estribos, el empleo de acero inoxidable en pernos de anclaje y ciertas armaduras, los detalles geométricos relativos a los sistemas de drenaje e instalaciones que se ubiquen en el tablero, el seguimiento de las deformaciones durante la vida útil del puente, los elementos previstos para facilitar la sustitución de los apoyos a futuro, las pilas huecas han de ser inspeccionables, etc.

2.2 Metodología BIM o Model Based Design

Si bien este no es el tema específico del presente artículo, creemos que merece la pena mencionar de forma no exhaustiva ciertos aspectos relativos a esta metodología:

- El modelo ha de contener de forma completa la información necesaria para construir. En el caso concreto de estos puentes han sido necesarios únicamente 6 *planos 2D* por puente que se integran en el propio modelo 3D.
- Estos planos se refieren a la descripción general, movimientos de tierras, aparatos de apoyo y planificación del mantenimiento futuro, puesto que el tratamiento 2D de estos aspectos presenta más valor añadido que su tratamiento 3D.

- El modelado de las armaduras permite anticipar problemas y diseñar soluciones que eviten dichos problemas.
- El coste de modelado 3D puede ser muy significativo frente a la clásica definición 2D, si bien las técnicas de diseño paramétrico, bien enfocadas y planteadas, permiten una reutilización del diseño y son una herramienta muy útil para tener en cuenta en el futuro cercano.
- Cuanto más compleja sea la geometría de un diseño, y cuanto más sea susceptible el diseño a pequeños cambios, más ventajas presenta el enfoque basado en modelos 3D.

3. Descripción de los puentes

Centrándonos ya en el aspecto estructural *clásico* de los puentes, el K62 presenta una configuración de luces 40+55+73+60 m, longitud total 228 m y altura máxima de pilas 35 m, macizas de sección rectangular. El puente mellizo de este, el K63 *Hommelvikbru Nordgående*, cuenta con una configuración de luces 55+69+73+53 m, longitud total 250 m y altura máxima de pilas 37 m. Ver figuras 2 a 6. Por

último, el puente K80 *Sandfærhus* dispone de luces 43+4×51+43 m, longitud total de tablero 290 m y altura máxima de pilas 7 m, con doble fuste circular por pila. Ver figuras 7 y 8.

El ancho de tablero es constante únicamente en el K62, de dimensión 14,70 m. Tanto para el K63 como el K80 el ancho de tablero es variable por condicionantes de trazado y facilidad constructiva. La variación en el caso del K63 es entre 14,80 m y 15,75 m, oscilando para el K80 entre 12,40 m y 14,30 m.

El trazado de ambos K62 y K63 presenta pendiente longitudinal constante y curvatura en planta también constante, conformando sus tableros un helicoide de plano director, de forma que gracias a su canto constante era factible, y deseable, su puesta en obra sencilla mediante lanzamiento.

El K80, en cambio, presenta una configuración geométrica del trazado muy compleja que le lleva a contar con ancho variable por la presencia de carriles de incorporación en el propio tablero, acuerdo vertical parabólico aproximadamente en el centro del puente y curvatura no constante en planta en ambos extremos del tablero. No obstante, el diseño de éste ha hecho posible el que pueda ser puesto en obra también mediante lanzamiento de forma sencilla, como se indica al final del siguiente capítulo.



Figura 2. Infografía de los puentes K62 y K63.



Figura 3. Infografía de los puentes K62 y K63.

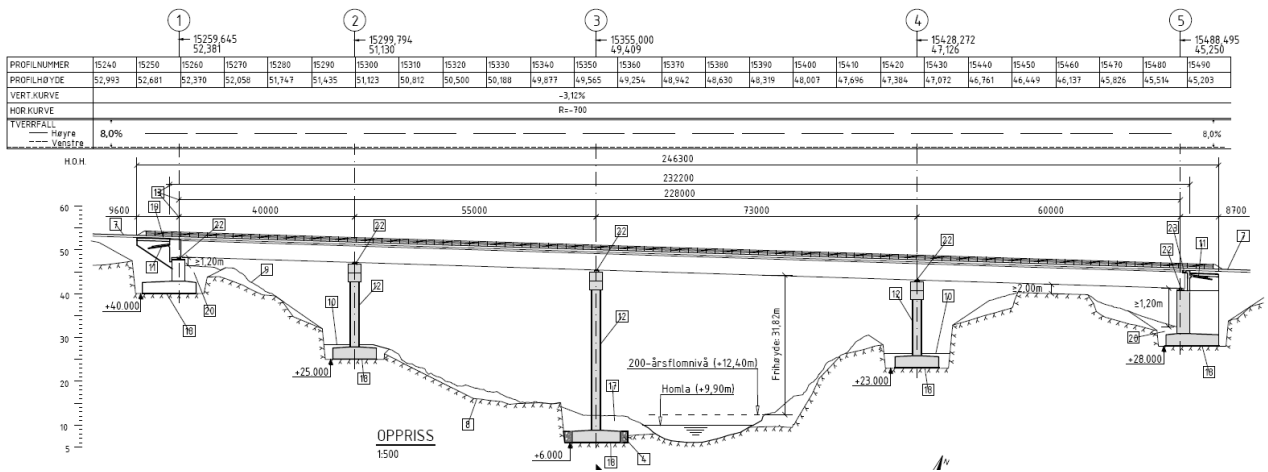


Figura 4. Alzado del K62.

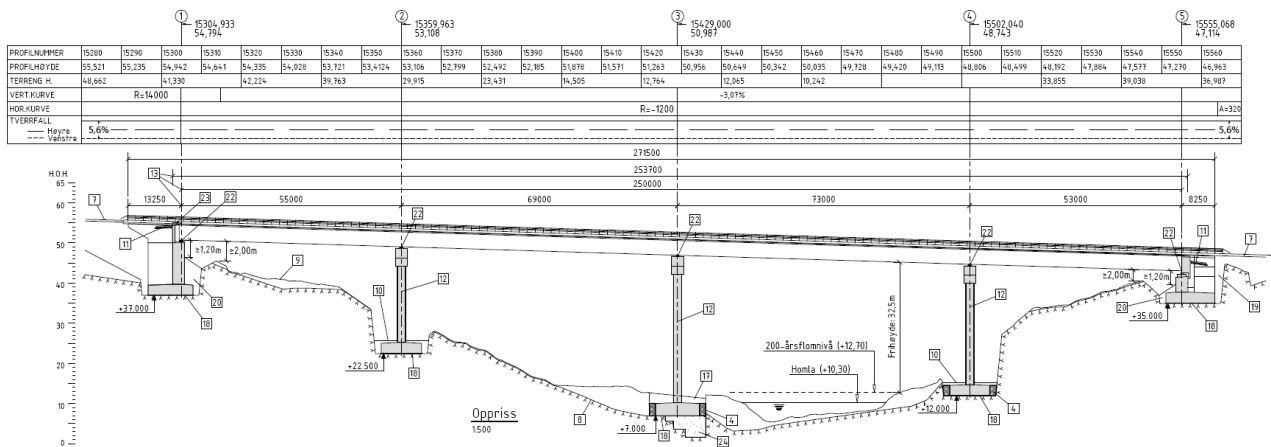


Figura 5. Alzado del K63.

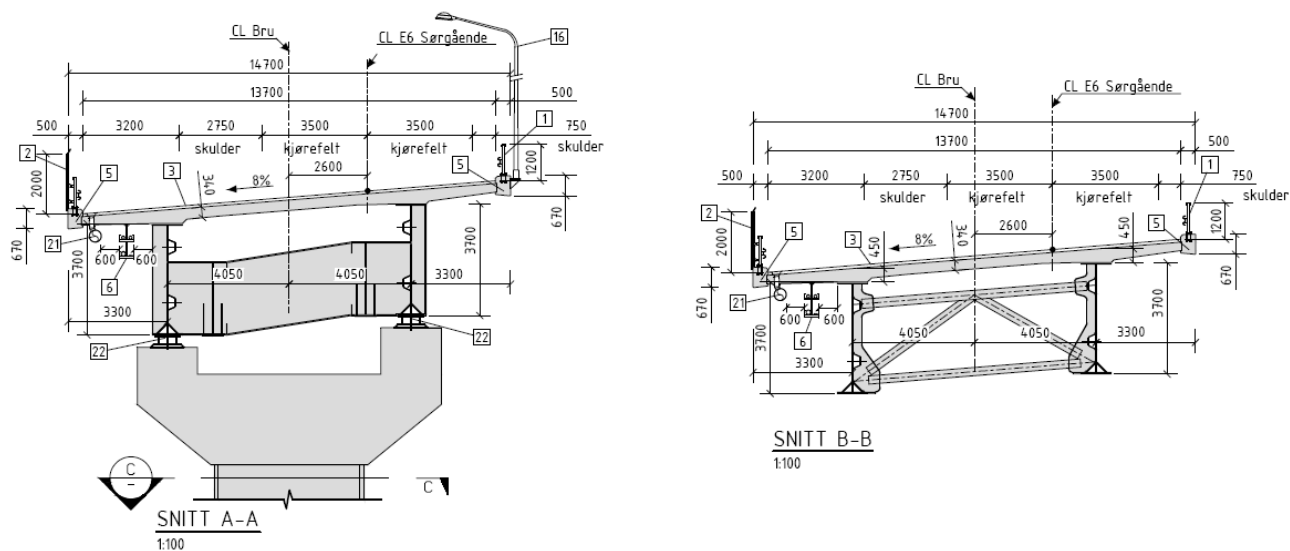


Figura 6. Sección del K62 asimilable a la del K63.

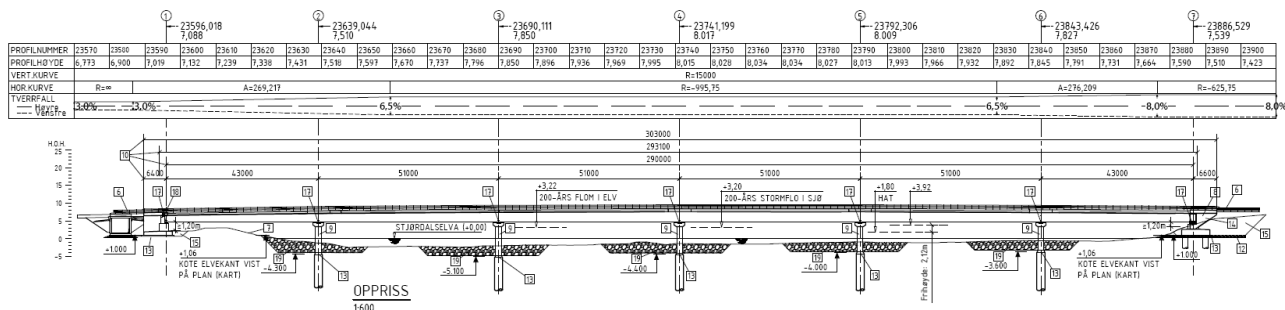


Figura 7. Alzado del K80.

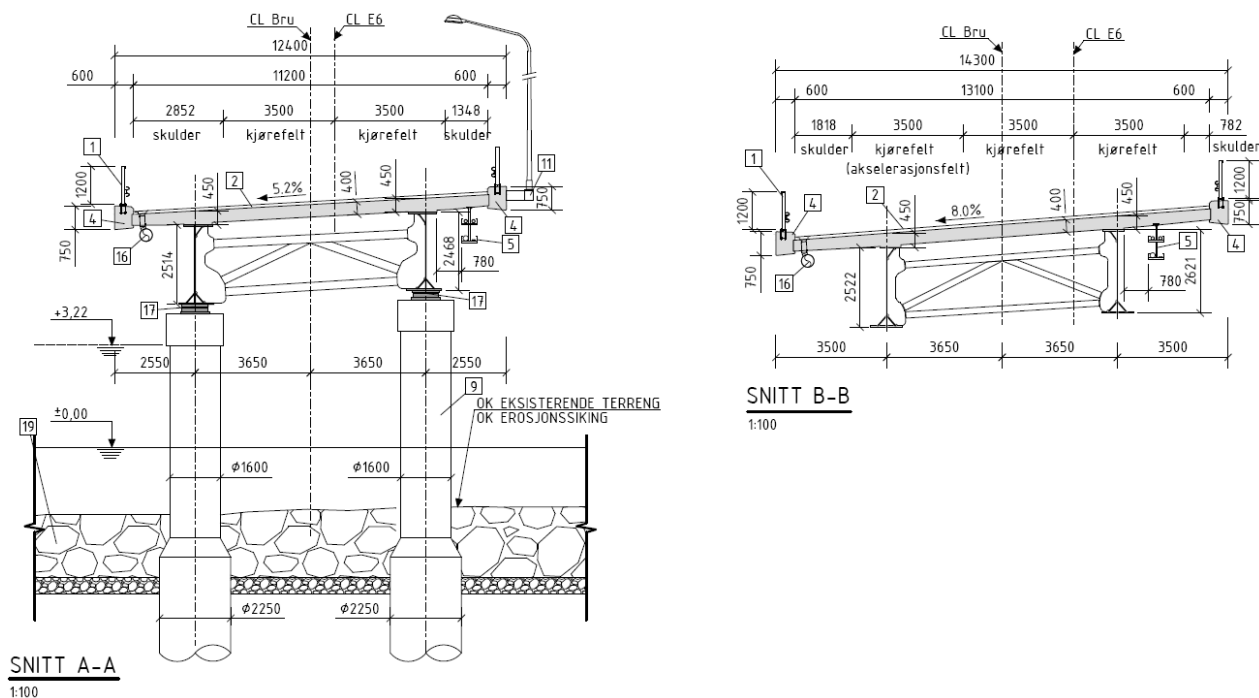


Figura 8. Sección del K80.

4. Aspectos significativos del diseño estructural de los puentes

La tipología de tablero mixto bñáceno con losa de hormigón in situ se identificó como la más eficiente para los tres puentes una vez valorados diferentes aspectos relativos a la seguridad, medioambientales, estructurales, constructivos, estéticos, económicos y relacionados con la normativa noruega. Básicamente, el tablero metálico está conformado por dos vigas metálicas de alma llena y gran porte (3,70 m de canto para el K62 y K63), arriostradas entre sí mediante diafragmas de alma llena de canto reducido sobre apoyos, y rigidizadores intermedios en K conformados por perfiles laminados y uniones atornilladas pretensadas. Ver figuras 9 y 10.

Para mantener bajo control las tensiones durante el lanzamiento las almas cuentan a lo largo de su contacto con el ala inferior con las clásicas células triangulares favoreciendo una adecuada introducción de carga local coplanaria con el alma.

El lanzamiento se ha previsto realizar mediante el empleo de una nariz, así como gatos verticales en punta para recuperación de flechas verticales previamente a la entrada en pilas y estribo de desembarco. El lanzamiento también cuenta con realizarse de la forma más ligera posible, sin ningún tipo de prelosa ni elemento adicional, excepto un arriostramiento provisional horizontal en el plano inferior del tablero de tipología cruz de San Andrés.

Las vigas del K62 y K63, de gran canto, cuentan también con un par de rigidizadores longitudinales cerrados en forma de “U” que mantienen la clasificación de las secciones transversales en valores bajos.

El desarrollo de los detalles de soldadura ha sido muy intenso y cuidado debido a los muy exigentes requisitos noruegos incluidos en la norma [2].



Figura 9. Tablero del K62 en el parque de prearmado.

Ya se ha mencionado que las pilas son macizas de sección rectangular. Este diseño choca con lo habitual en España. En Noruega el código [5] prescribe que las pilas huecas han de ser accesibles y disponer de un acceso interior, por lo que en este caso resultó más conveniente diseñarlas macizas, solución más habitual en Noruega.



Figura 10. Diferentes capas del System 1 aplicado en taller.

Respecto del sistema de protección contra la corrosión de las superficies de acero al carbono estructural (ver figura 10), las más numerosas habitualmente, el código [6] prescribe las dos únicas alternativas posibles, ambas basadas en pinturas: *system 2*, adecuado para lo que en España definiríamos como entornos salinos, muy próximos a la costa, y *system 1*, adecuado para todos los demás casos. Ambos sistemas están basados en la aplicación de una metalización de zinc mediante proyección

térmica inmediatamente posterior al ya clásico chorreado Sa 2½.

Otro de los aspectos más destacables desde nuestra perspectiva española es el hincapié normativo noruego en la reducción de las juntas de dilatación de los tableros, incluso a costa de empeorar significativamente el comportamiento estructural del puente. Así, en los tres puentes proyectados solamente existe una junta de dilatación, ubicada entre tablero y estribo, siendo el otro estribo el punto fijo del tablero. El código [5] prescribe que el estribo fijo, en estos casos, habrá de ser diseñado con una configuración *estándar noruega*, como la mostrada en la figura 11, en la que las aletas están incorporadas al propio tablero, y cuelgan de él.

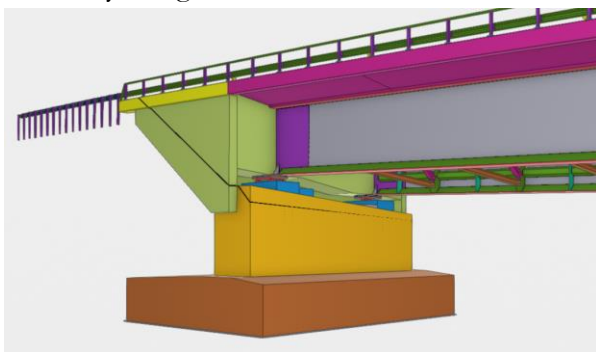


Figura 11. Estribo fijo típico. La línea negra representa la intersección con el terraplén de relleno.

Aunque no se aprecia en la figura, el estribo cuenta con la clásica losa de transición, sin disponerse junta mecánica alguna en el asfalto.

Otro aspecto singular es la prescripción del código noruego [5] de hormigonar las vigas de borde dispuestas en el tablero (figuras 6 y 8) en una fase posterior al hormigonado completo de la losa de compresión en sí, de forma que se garantiza la obtención de una geometría final que permite absorber las eventuales desviaciones de cota que pudieran haber ocurrido a lo largo de la ejecución de la losa.

El nivel de calidad exigido en cuanto a la preparación de las superficies de acero a proteger mediante pinturas corresponde al grado P3 según NS-EN ISO 8501-3 [7], una decisión muy acertada en nuestra opinión, y que empieza a ser un estándar también en España. Ver figura 12.



Figura 12. Ejemplo de redondeo de aristas con 2 mm de radio según el código [7], grado P3.

Según la normativa noruega [5] las cimentaciones han de presentar en su cara superior una pendiente al objeto de facilitar el drenaje de agua de lluvia infiltrada, si bien no se exige su impermeabilización (figura 13).

Adicionalmente, dado que es muy habitual en Noruega cimentar sobre macizos rocosos de muy buena calidad que han de excavar-se mediante voladuras controladas, se suele exigir el armado de la capa de hormigón de limpieza que regulariza la superficie de apoyo y hace frente simultáneamente a las sobre excavaciones inherentes a las voladuras (figura 13).

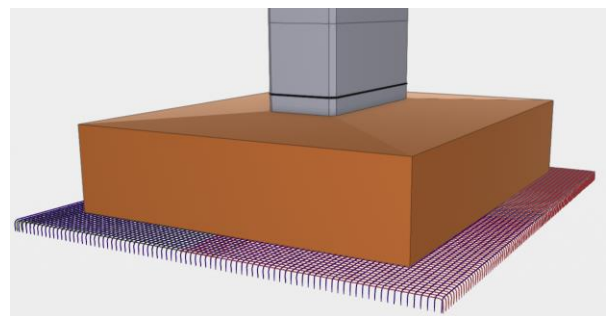


Figura 13. Pendiente para favorecer el drenaje en la cara superior de las zapatas y armado de hormigón de limpieza.

También es muy habitual en Noruega realizar un modelo digital mediante un escaneo láser del fondo de las excavaciones una vez retirado el material suelto para evaluar correctamente la regularización necesaria con el hormigón de limpieza. Ver figura 14.

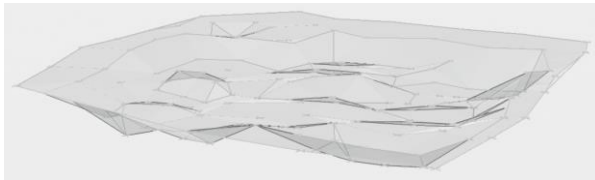


Figura 14. Escaneo láser de fondo de excavación de la misma zapata mostrada en la figura anterior.

La referencia [6] prescribe la verificación de la estanqueidad de los espacios que no sean accesibles. Ver figura 15.



Figura 15. Prueba de estanqueidad en las células triangulares del ala inferior.

El modelo 3D incorpora las notas generales que son habituales en cualquier proyecto (figura 16).

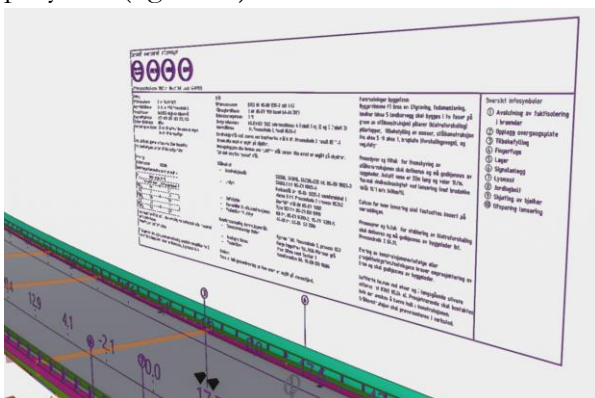


Figura 16. Infoblokk, o notas generales.

Como mencionábamos, el modelo 3D contiene toda la información que el contratista

necesita para poder construir. Cada *objeto* lleva aparejada toda una serie de metadatos. En la figura 17 puede apreciarse parte de la información que incorpora un simple panel de chapa del alma de una viga principal: nombre del elemento, tipo de acero, sistema de protección contra la corrosión, color de acabado, temperatura de referencia durante el montaje para los ajustes dimensionales durante la fabricación en taller, normativa [6] que debe guiar su ejecución, MMI (Model Maturity Index) del objeto, protección anticorrosiva de la cara superior del ala superior en contacto con la losa de compresión, etc.

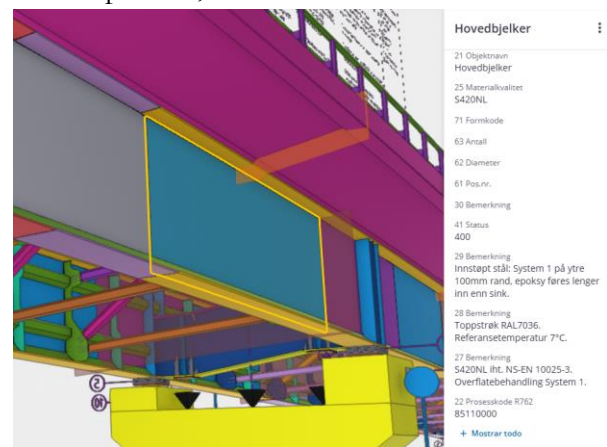


Figura 17. Ejemplo de metadatos que acompañan a cada *objeto*.

El modelo contiene el 100% de la armadura a disponer (figura 18). En este sentido, el despiece de las barras sale directamente del modelo 3D, sin necesidad de producir un despiece *manual clásico*. Este despiece se produce en la fase IFC mencionada anteriormente.

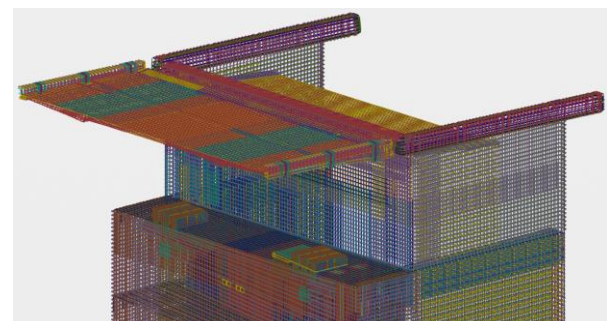


Figura 18. Armado del estribo derecho.

Con relación a los aspectos medioambientales, fue preciso planificar la ejecución de las cimentaciones del K80 en

función de las ventanas medioambientales disponibles en el río Stjørdal, que discurre bajo el puente.

En Noruega es muy habitual la congelación parcial de los ríos, por lo que la norma [5] prescribe la necesidad de considerar la carga de hielo que la subestructura de los puentes ha de soportar (figura 19). Las expresiones normativas suelen ser conservadoras respecto a las cargas de esta naturaleza, por lo que fue preciso realizar una evaluación de estas personalizada a la ubicación del K80, logrando una reducción muy significativa de las cargas normativas que, en cualquier caso, siempre requiere de una aprobación previa de SVV.



Figura 19. Carga transmitida por el hielo.

En la figura 20 se aprecia cómo, jugando con la altura de las almas de ambas vigas principales del K80, fue posible ajustar el peralte transversal del tablero, así como la rasante longitudinal variable del mismo, permitiendo al mismo tiempo un lanzamiento sencillo del tablero metálico gracias a una curvatura constante en planta de las almas, cuya ala inferior se mantiene en un plano horizontal.

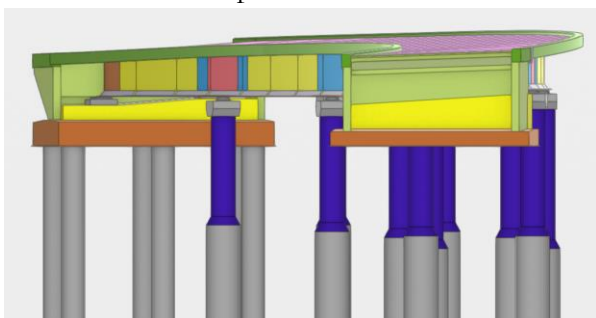


Figura 20. Proyección recta del K80 desde uno de los estribos, en “visual”. Las alas inferiores de mantienen en un plano horizontal, siendo variable el canto de ambas vigas principales.

Esta compleja geometría del tablero metálico, motivada por la variable geometría del trazado, fue modelada mediante diseño paramétrico. Durante el desarrollo de la estructura hubo un ligero cambio de trazado que pudo ser fácilmente asumido por la estrategia de modelización empleada en el diseño. En un enfoque tradicional este tipo de cambios sobrevenidos hubiera implicado muchísimo trabajo desperdiciado.

Referencias

- [1] Eurokode NS-EN 1990 til NS-EN 1999. Standard Norge.
- [2] Nasjonale Tillegg av Eurokodene (NA). Standard Norge.
- [3] NA-Rundskriv. Statens Vegvesen.
- [4] Håndbøker. Statens Vegvesen.
- [5] Håndbok N400 Bruprosjektering. Statens Vegvesen.
- [6] Håndbok R762 Prosesskode 2. Statens Vegvesen.
- [7] NS-EN ISO 8501-3 Forbehandling av ståloverflater før påføring av maling og lignende produkter - Visuell bedømmelse av overflaterenhet - Del 3: Rengjøringsgrad av sveis, kanter og andre områder med overflatedefekter (ISO 8501-3:2006).