

Puente de Barkarby en Suecia

Barkarby Bridge in Sweden

**Manuel Biedma García^a, Francisco Javier Martínez López^b, Mayra Toledo Serrano^c
y José Manuel González Parejo^d**

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Departamento Estructuras Metálicas y Procedimientos Constructivos. manuel.biedma.garcia@acciona.com

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

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyectos División de Estructuras. maira.toledo.serrano@acciona.com

^d Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Cuerpo de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos del Estado. Confederación Hidrográfica Guadiana. jmgonzalez3@chguadiana.es

RESUMEN

El puente de Barkarby se ha diseñado para formar parte del tramo Barkarby-Kallhöl de la autovía Sundbyberg-Kungsågen situada en Estocolmo, Suecia. Permite el paso del tráfico rodado sobre la línea de ferrocarril Sundbyberg-Kungsågen y sobre la autovía Västeras-Stockholm. Es un puente singular ya que se ha diseñado desde el principio para usarse como un puente de carretera en una primera fase, y como un puente combinado peatonal-tráfico rodado en una segunda fase. Además, en la tercera fase proporciona acceso peatonal a la estación de ferrocarril de Barkarby, a la que se conecta. Estos factores han dado lugar a un diseño poco usual de un tablero de tipo mixto de planta trapezoidal y ancho variable.

ABSTRACT

Barkarby Bridge is a bridge designed to take part of the Barkarby-Kallhöl section in the Sundbyberg-Kungsågen highway line project in Stockholm, Sweden. This bridge allows the road traffic to cross over the Sundbyberg-Kungsågen railway line and over the Västeras-Stockholm highway. This is a singular bridge because is intended to be used as a road bridge in a first phase and as a combined pedestrian-road bridge in a second phase. In addition, it will provide access to the pedestrians to the new railway station. These factors have implied to design a non-usual trapezoidal and variable deck. The deck typology corresponds to a composite steel/concrete type.

PALABRAS CLAVE: puente mixto, almas inclinadas, arriostamiento romboidal, ancho variable.

KEYWORDS: composite bridge, inclined webs, diamond bracing, variable width.

1. Introducción

El puente de Barkarby se encuentra en el tramo Barkarby-Kallhöl de la autovía Sundbyberg-Kungsågen en Estocolmo, Suecia. Este puente permite que el tráfico rodado cruce sobre la línea

ferroviaria Sundbyberg-Kungsågen y la autovía Västeras-Estocolmo.

El objetivo principal del puente era reemplazar al viejo puente de Barkarby que no

era capaz de compatibilizar el tráfico rodado con los nuevos usos a los que era necesario hacer frente: el puente había de estar conectado a la nueva estación de ferrocarril de Barkarby, situada adyacente a él. Ver figura 1. Adicionalmente, el viejo puente de Barkarby estaba afectado por varias patologías típicas de los puentes de hormigón situados en entornos urbanos. Teniendo en cuenta todos estos condicionantes, Trafikverket, la autoridad de carreteras sueca, decidió reemplazar el viejo puente y construir uno nuevo adyacente a éste y que finalmente fue demolido.

Éste es el primer puente que Acciona Infraestructuras ha llevado a cabo en Suecia como contratista de EPC. Acciona Ingeniería estuvo al cargo de la ingeniería de detalle del proyecto y de la asistencia técnica a la obra

durante su ejecución. Acciona Construcción se encargó de la obra en sí.

2. Descripción del puente

El puente de Barkarby presenta una longitud desarrollada total de 250.25 m. El trazado es recto en planta, excepto en los últimos 17 m donde sigue una curva de radio constante e igual a 500 m. La longitud total se distribuye en 9 vanos, el mayor de los cuales alcanza los 32,40 m. El tablero se distribuye a su vez en tres tableros diferentes, separados entre ellos por juntas de dilatación. El primer tablero está compuesto únicamente por el primer vano. El segundo tablero está constituido por los siguientes tres vanos, y el tercer tablero está formado por los últimos 5 tramos. Ver figura 1.

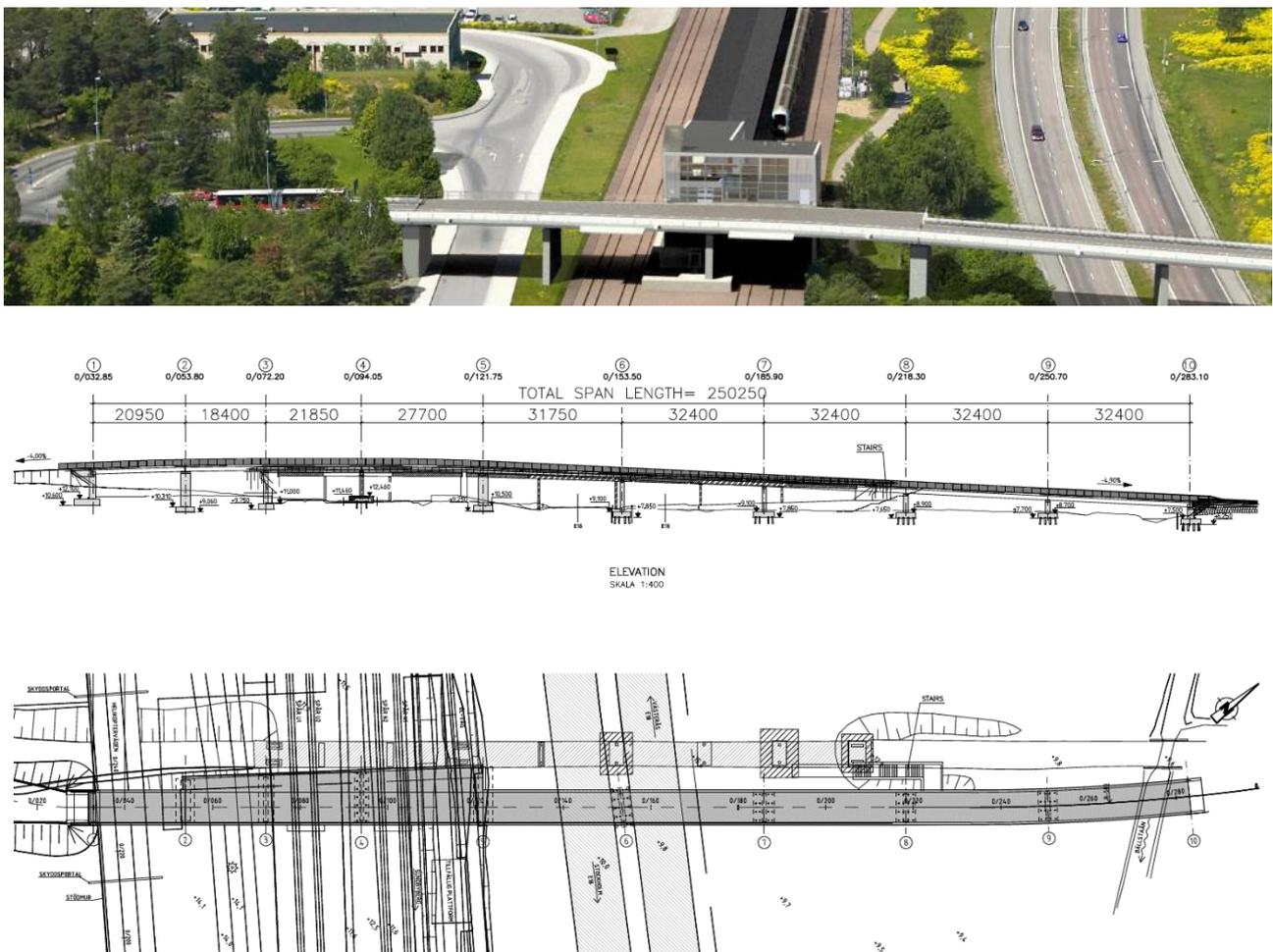


Figura 1. Vista aérea, planta y alzado.

El primer y tercer tablero cuentan con 8.00 m de ancho y están diseñados con la misma tipología: tablero mixto bijáceno formado por vigas simétricas de acero de sección doble T y un canto constante de 900 mm separadas 3.46 m al nivel de los apoyos, alineadas de forma paralela al eje central del tablero. Ver figura 2.

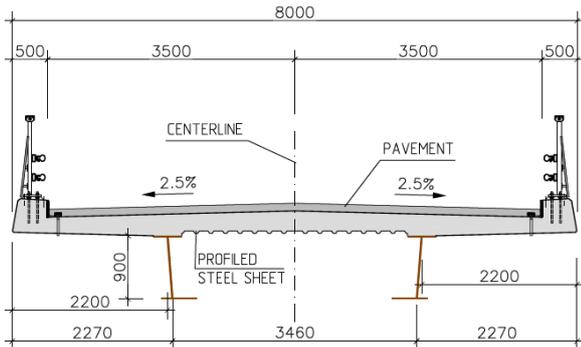


Figura 2. Sección transversal tipo bijáceno.

La singularidad de estas vigas es que sus almas presentan una cierta inclinación, es decir, los planos que las contienen no son verticales. El segundo tablero tiene un ancho total que varía de 11.10 m a 13.80 m. Tipológicamente es un tablero mixto trijáceno, formado por tres vigas de acero de canto constante 900 mm y almas

inclinadas también. Ver figura 3. En la figura 1 puede apreciarse, en la planta, la forma trapezoidal de este segundo tablero.

Entre las alas inferiores del tablero se dispuso un plano de arriostramiento horizontal de tipo romboidal para resistir las fuerzas de torsión que podrían actuar sobre el tablero. Los rigidizadores intermedios en K se han ubicado cada 3.459 m para controlar el efecto de distorsión de las cargas excéntricas que actúan en el tablero. Los diafragmas de tipo alma llena se encuentran únicamente sobre pilares y estribos. En la figura 4 pueden apreciarse todos estos elementos estructurales. En el diafragma del estribo puede verse la boca de hombre diseñada para poder acceder al espacio situado debajo de la junta de dilatación y poder realizar un correcto mantenimiento.

En las figuras 5 y 6 se aprecian algunos detalles de la ejecución de la estructura metálica.

Las conducciones de colores llamativos no son más que conductos para el paso de electricidad, telecomunicaciones, señalización, etc.

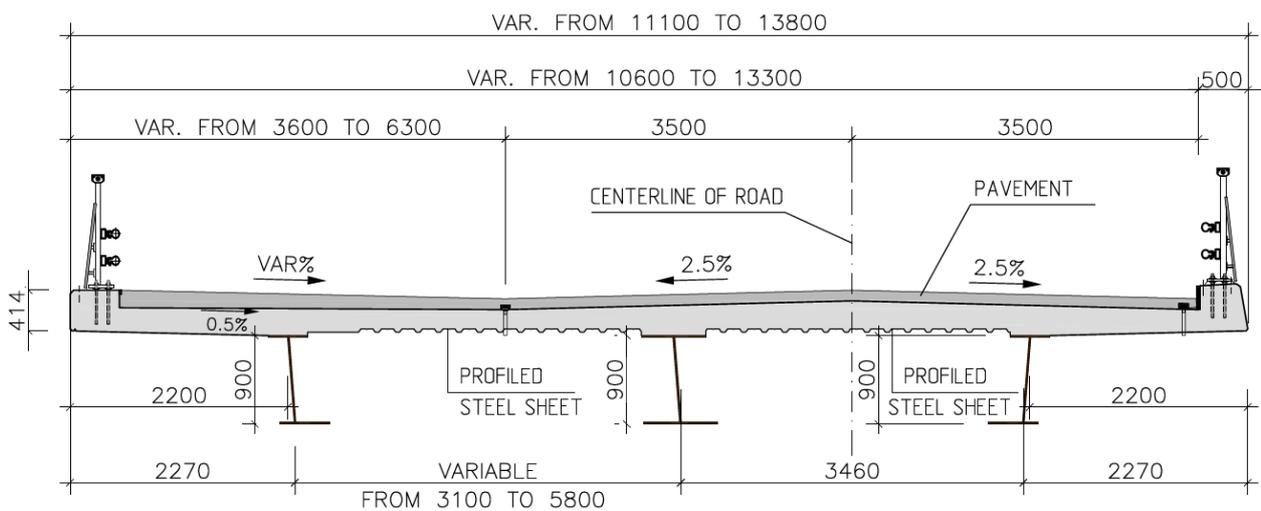


Figura 3. Sección transversal tipo trijáceno.



Figura 4. Diafragma con boca de hombre, rigidizadores intermedios y arriostramiento en diamante.



Figura 5. Conexión de los rigidizadores intermedios.



Figura 6. Preparación de superficies.

Sobre las vigas de acero se dispuso una losa de hormigón de 28,2 cm de canto máximo. Dicha losa fue hormigonada mediante el empleo de encofrados colgantes desde las vigas armadas, de forma que pudieron ejecutarse ambos voladizos. Para la zona situada entre vigas armadas se usaron chapas nervadas de acero a modo de encofrado perdido. La losa de

hormigón tiene pendientes transversales constantes del 2.5% en el primer y tercer tablero. El canto mínimo alcanza un valor de 21.6 cm en la sección situada en el borde del pavimento. En el segundo tablero las pendientes transversales son variables. Cada voladizo de la losa tiene 2.20 m de largo. Con estas dimensiones los tableros son capaces de acomodar dos carriles de tráfico rodado de 3.50 m de ancho cada uno, y 0.50 m a ambos lados para ubicar las barreras laterales.

A todas las superficies de acero expuestas, incluidas las chapas nervadas de acero, se les aplicó un sistema de protección anticorrosión C5M-H. El grado de preparación de soldaduras, bordes y otras áreas con imperfecciones superficiales fue P3 [1] de acuerdo con los estrictos estándares suecos.

Como puede apreciarse en las figuras 2 y 3 el pavimento tiene 11 cm de espesor y está ubicado entre las caras internas de las barreras laterales.

En ambos extremos del puente se han diseñado sendos estribos. Todos los soportes intermedios están compuestos por pilas de tipo muro de hormigón armado y presentan una altura media igual a 6,00 m, con un máximo de 7,90 m. El soporte 6 está orientado de forma paralela al eje de la carretera, por lo que su eje principal tiene un esviaje de unos 8°. El soporte 4 está ubicado en el centro del andén de la vía que discurre bajo el tablero del puente. Al estar situado en una zona que debía de continuar en servicio, y debido a las pocas horas disponibles para la construcción de esta pila, ésta fue diseñada en una primera fase como una pila con tres fustes, estando formado cada fuste por un perfil laminado de acero estructural.

El cabecero de conexión de los tres fustes era de hormigón prefabricado. Las dimensiones del mismo son 1.00 m de canto, 9.760 m de largo y 1.00 m de ancho. En una segunda fase los tres fustes finalmente quedaron embebidos en una pila análoga a la de los otros soportes intermedios. Ver figura 7.



Figura 7. Primera fase del soporte 4 y montaje no apeado del tablero.

En cuanto a los aspectos geotécnicos, el suelo situado en el trasdós del estribo 10 presentaba una capacidad portante muy reducida, por lo que hubo de diseñarse un tratamiento de mejora del mismo a base de columnas de grava-cemento. Ver figura 8. Adicionalmente a este tratamiento, el terraplén que apoyaba en el mismo se diseñó con un núcleo de cellplast (poliestireno extruido o XPS) para reducir el peso transmitido al suelo. Ver figura 9.

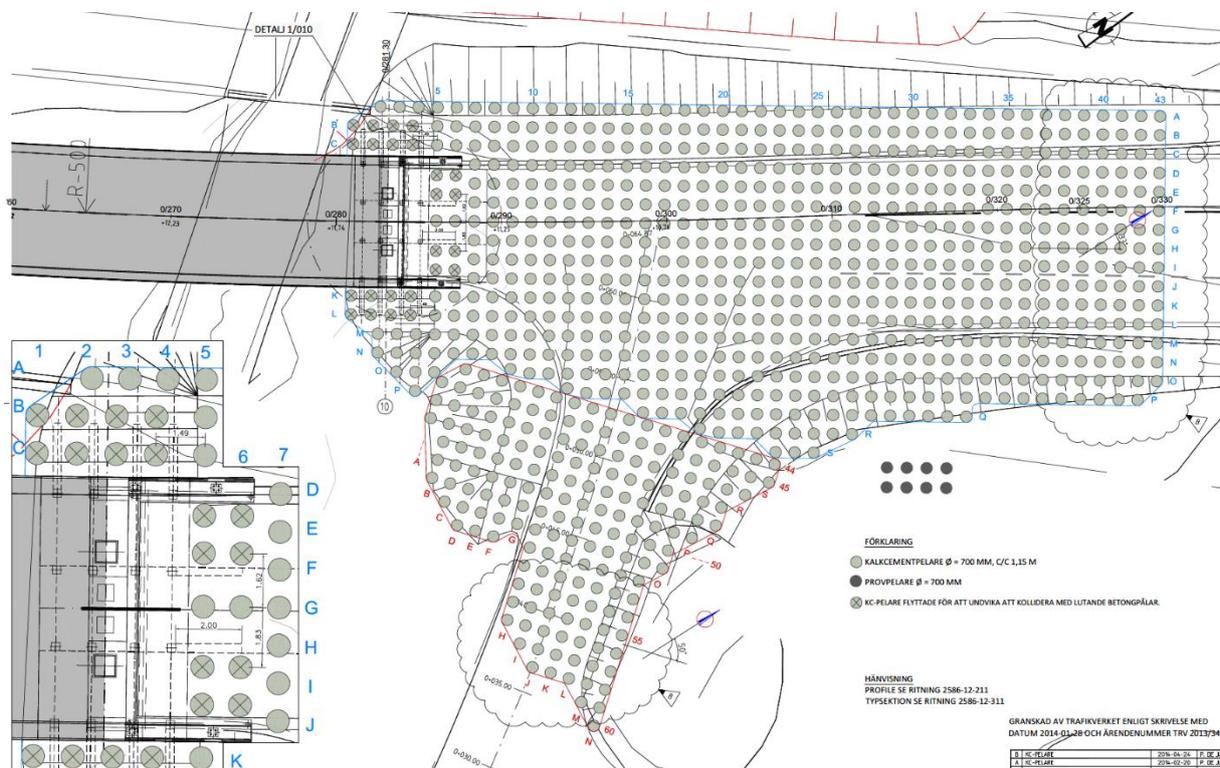


Figura 8. Tratamiento del terraplén en el trasdós del estribo 10.



Figura 9. Terraplén con núcleo de cellplast.

Los soportes 1, 2, 3 y 5 se apoyan en zapatas. El resto de los soportes se apoyan en pilotes cuadrados prefabricados de 275×275 mm, excepto el soporte 4, donde la cimentación se ha resuelto a base de micropilotes de tubos de acero $\phi 220 \times 10$ mm. Esta diferencia radica en, como se ha mencionado antes, las pocas horas de trabajo diarias de las que se disponía en el entorno de este soporte por situarse en el centro del andén de la estación de ferrocarril.

Los apoyos de todos los soportes son de tipo elastomérico laminado que, aunque se extienden ampliamente en Europa, no son de uso común en Suecia.

3. Ejecución

Las cimentaciones de todos los soportes se ejecutaron utilizando métodos de construcción clásicos tanto para las cimentaciones superficiales como para las profundas.

Las pilas y los estribos fueron cuidadosamente hormigonados para tener bajo control la variación de la temperatura interior y superficial del hormigón durante su fraguado y endurecimiento con el fin de limitar la aparición de fisuras superficiales por contracción térmica. Es muy común en Suecia, debido a las bajas temperaturas durante el invierno y al calor de hidratación del cemento, aislar térmicamente el encofrado para limitar los gradientes de temperatura.

Simultáneamente, la fabricación de los elementos de acero estructural del tablero se llevó a cabo en España en los Talleres Centrales de Acciona Construcción. Ver figuras 10 y 11.

Posteriormente los componentes fabricados fueron transportados desde España a Suecia por carretera y mar. Debido a las limitaciones dimensionales de los medios de transporte el tablero fue dividido en subconjuntos minimizando la necesidad de realizar uniones en obra. Todas las uniones fueron diseñadas soldadas, tanto en taller como en obra.



Figura 10. Fabricación en taller.



Figura 11. Fabricación en taller.

Todas las etapas de construcción del puente han sido diseñadas para evitar la interrupción del tráfico en carreteras y ferrocarriles. Como resultado, el proceso de construcción es una parte relevante del diseño del puente. Por lo tanto, la ejecución de los tableros ha sido fundamentalmente no apeada, reduciéndose únicamente la necesidad de apea a algunas uniones soldadas de las vigas principales.

Una vez que los componentes de acero estructural del tablero fueron ejecutados completamente, el encofrado de la losa superior de hormigón se suspendió de las vigas principales mediante grúas automóvil convencionales. Ver figuras 12, 13 y 14. El encofrado se retiró tan pronto como la losa superior de hormigón alcanzó un nivel de resistencia adecuado y se reutilizó en otros tramos del tablero.



Figura 12. Encofrado no apeado de la losa del tablero.



Figura 13. Diferentes fases de ejecución, simultáneamente.



Figura 14. Encofrado no apeado de la losa del tablero.

Las etapas finales de la construcción del puente consistieron en la construcción de la barrera, postes de luz, pavimento, señales viales, tuberías de calefacción eléctrica y servicios urbanos, etc. Ver figura 15.



Figura 15. Vista general del puente.

4. Diseño y cálculo

De forma general el tablero del puente tiene el comportamiento estructural de una viga cajón: el plano de arriostramiento romboidal inferior actúa como el ala inferior de una viga cajón, cerrando el circuito de torsiones junto a las almas inclinadas y a la losa superior de hormigón una vez ha endurecido. Evidentemente este mecanismo no está presente durante las fase de hormigonado de la losa superior de hormigón, por lo que se hicieron cálculos detallados para evaluar el riesgo de pandeo lateral-torsional durante esa situación provisional del tablero. Ver figura 16.

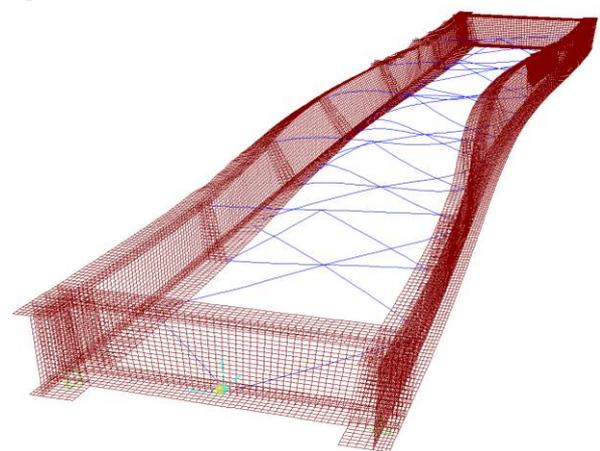


Figura 16. Primer modo de pandeo lateral-torsional del vano 1.

Todas las etapas de construcción se han tenido en cuenta en los cálculos mediante el programa informático RM Bridge. Este software ha permitido gestionar de una manera muy sencilla el estado tensional de todas las secciones transversales del tablero a lo largo de la ejecución del puente.

Básicamente el cálculo global del tablero hubo de ser doble: según los Eurocódigos y según la normativa local sueca.

4. Singularidades suecas

Algunas de las singularidades suecas más significativas respecto de la práctica común en España son las siguientes:

- Empleo de acero estructural de mayor resiliencia, motivado por las bajas temperaturas, que permita emplear espesores de chapa significativos.
- Gusto por los acabados superficiales del hormigón con aspecto de tabloncillos de madera. Ver figura 17.



Figura 17. Acabado superficial con aspecto de madera.

- Compleja y profusa normativa local con rango superior a los Eurocódigos. [2], [3], [4]. En estas tres referencias se encuentran otras múltiples referencias a considerar en el diseño de puentes de carretera. Es muy relevante destacar que

adicionalmente a estos estándares hay una multitud de adendas, correcciones, anejos, notas de servicio, etc. que modifican parcialmente lo incluido en los estándares.

- Poca o nula experiencia en el empleo de aparatos de apoyo elastoméricos laminados.
- Existencia de una amplia base de datos del organismo de carreteras Trafikverket con planos estándar como ayuda para definir los elementos constructivos más usuales: barreras de contención, protectores de catenaria, juntas de dilatación, elementos de drenaje, etc.
- Cuidado extremo a la hora de planificar el desagüe del tablero, con drenajes superficiales y profundos diferenciados.
- Necesidad de disponer unos electrodos insertados en la superficie de los elementos de hormigón para facilitar las operaciones de seguimiento de una eventual degradación del hormigón. Ver figura 18.



Figura 18. Electrodo insertado.

- Disposición de calefacción eléctrica en el entorno de los elementos de drenaje del tablero para impedir la formación de hielo en los períodos invernales y asegurar el drenaje del tablero.
- Evaluación de la capacidad del tablero de cara a soportar el tránsito de una multitud muy diferente de convoyes de tipo militar.

- Cálculo en detalle de la evolución de la temperatura del hormigón durante la hidratación del cemento para limitar los gradientes de temperatura y la fisuración superficial por contracción térmica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a todos los profesionales de Acciona Construcción el gran trabajo realizado que ha hecho posible el diseño y fabricación de este puente, el primer puente construido por Acciona Infraestructuras en Suecia.

Referencias

- [1] International Organization for Standardization (ISO), Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Visual assessment of surface cleanliness. Part 3: Preparation of grades of welds, edges and other areas with surface imperfections ISO 8501-3, 2006.
- [2] Trafikverket, Trafikverkets tekniska krav Bro TRV publ nr 2011:085. TRVK Bro 11, 2011.
- [3] Trafikverket, Trafikverkets tekniska råd Bro TRV publ nr 2011:086. TRVR Bro 11, 2011.
- [4] Trafikverket, Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner publ nr 2011:047. TK Geo 11, 2011.