

# PUENTE INTEGRAL DE FFCC SOBRE EL RÍO MOTALA EN NORRKÖPING, SUECIA

## *Integral Railway over Motala Bridge in Norrköping, Sweden*

Miguel Bañares Dorado <sup>a</sup>, Mikel Aramburu Celaya <sup>b</sup>, Mario Retamosa Baena <sup>c</sup>,

Lucía Navarro Mateos <sup>d</sup> y Ángel Lázaro Rodríguez <sup>e</sup>

<sup>a</sup> ICCP. Esteyco. Director de Estructuras. miguel.banares@esteyco.com

<sup>b</sup> ICCP. Esteyco. Ing. de Estructuras. mikel.aramburu@esteyco.com

<sup>c</sup> ICCP. Esteyco. Director Ing. Del Terreno. mario.retamosa@esteyco.com

<sup>d</sup> ICCP. Esteyco. Ing. de Estructuras. lucia.navarro@esteyco.com

<sup>e</sup> ICCP. Esteyco. Ing. de Estructuras. angel.lazaro@esteyco.com

### RESUMEN

Esteyco propone un puente integral de ferrocarril como solución a los condicionantes constructivos y de mantenimiento que presenta el paso sobre el río Motala en Norrköping (Suecia)

Se decide sustituir la compleja y costosa ejecución de la subestructura sumergida (2 pilas centrales y ambos estribos) por 4 parejas de pilas-pilote mixtas por alineación ejecutados sobre escollera, lo que permite eliminar los apoyos en cabeza y, por tanto, su mantenimiento y sustitución. La solución proyectada elimina igualmente las juntas de dilatación en ambos extremos del tablero

### ABSTRACT

Esteyco proposes an integral railway bridge to overcome the constructive and maintenance constraints that the crossing over Motala Bridge in Norrköping (Sweden) presents.

Original design composed by complex and pricey submerged substructure (2 central piers and both abutments) is substituted by 4 pairs of composite pier piles drilled over rockfill, what allows to remove the bearings at its top, and consequently its maintenance and substitution. Expansion joints are no longer needed at both ends of superstructure because of the new design.

**PALABRAS CLAVE:** Puente Integral, Hormigón Pretensado, Pila – Pilote Mixta, Suecia, FFCC, Hielo.

**KEYWORDS:** Integral Bridge, Prestressed Concrete, Composite Pier – Pile, Sweden, Railway, Ice.

## 1. Introducción

Tras haber participado previamente en la fase de licitación, Esteyco recibe el encargo de desarrollar la Ingeniería de Detalle de 8

estructuras vinculadas al ramal ferroviario en Norrköping (Suecia) dentro del contrato

adjudicado a la constructora española Rover Alcisa por Trafikverket.

La premisa transmitida por parte del cliente era evitar modificaciones respecto a los diseños del Anteproyecto referencial, dadas las reticencias de Trafikverket ante posibles cambios en el diseño.

Sin embargo, el diseño preliminar de la estructura de ferrocarril que debe salvar el río Motala presentaba una interferencia con la cimentación sumergida de la estructura adyacente existente y exigía, por tanto, replantear una solución ejecutable en tiempo y forma.

## 2. Diseño Inicial y Condicionantes

El viaducto en fase de anteproyecto constaba de una superestructura de Hormigón Postesado con sección en “U” (vigas laterales antepechadas) y una subestructura con dos estribos cerrados sobre cimentación profunda y dos pilas intermedias sobre el cauce con sendos encepados sumergidos de los que arrancaban micropilotes inclinados.

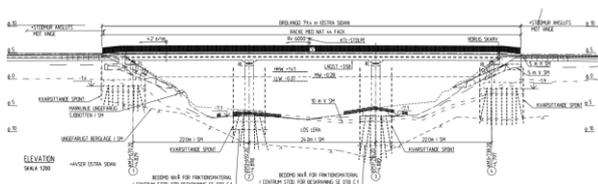


Figura 1. Alzado Proyecto Referencial

La conexión entre subestructura y superestructura se materializaba mediante apoyos POT.

Esta solución, típicamente sueca y recogida en distintos manuales nacionales, no resolvía el problema geométrico y constructivo que generaba la proximidad del puente carretero adosado.

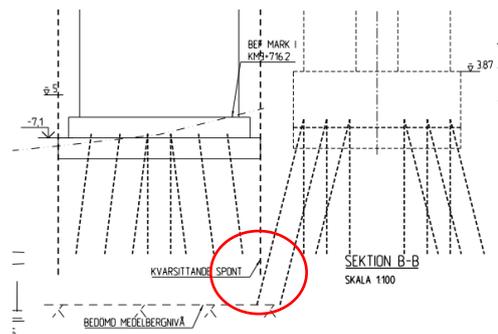


Figura 2. Interferencia entre estructura existente y nuevo puente de ferrocarril

## 3. Diseño Final

### 3.1 Descripción

Se decide sustituir la compleja y costosa ejecución de la subestructura sumergida por 2 parejas de pilas-pilote mixtas por alineación, eliminando los apoyos en cabeza de pilas y planteando, por tanto, una estructura integral de hormigón pretensado y cimentaciones mediante pilas – pilote de sección mixta acero - hormigón.

Debido a la elevada dureza de la roca característica de esta zona geográfica y la consecuente dificultad para su perforación el diámetro máximo de las pilas pilote queda limitado a un valor máximo de 1200mm. Como resultado de este condicionante se plantea una configuración de pilotes (800mm en estribos y 1200mm en pilas centrales) de alta esbeltez con alturas libres que alcanzan los 20.5m.

Se plantean pilotes de menor diámetro para las posiciones extremas con el fin de flexibilizar dichas alineaciones y reducir, por tanto, los esfuerzos producidos por las deformaciones impuestas y el pretensado.

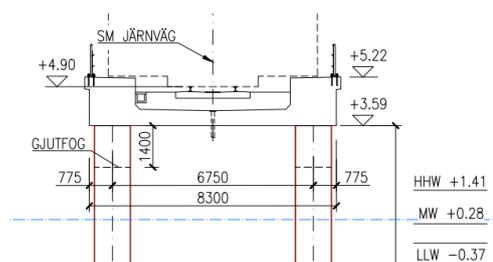


Figura 3. Sección Recta Pila



Para considerar el límite inferior de dicho análisis se reduce el espesor del elemento metálico por la corrosión esperada a 100 años.

Table 21. Recommended values for thickness reduction of bearing piles and sheet piling installed in fresh or sea water due to corrosion [mm].

Design life required in designs	5 years	25 years	50 years	75 years	100 years
Normal fresh water (river, navigable channel, ...) in a high stress (water line)	0.15	0.55	0.90	1.15	1.40
Badly polluted fresh water (sewage, industrial waste water...) in a high stress area (water line)	0.30	1.30	2.30	3.30	4.30
Sea water in temperate climate in high stress area (shallow water and splash zones)	0.55	1.90	3.75	5.60	7.50
Sea water in temperate climate in areas permanently under water and tidal zones.	0.25	0.90	1.75	2.60	3.50

Figura 5. Reducción espesor por corrosión.[2]

Tendremos por tanto para condición rígida un pilote con camisa exterior de **12.5mm** de acero S355 y para condición flexible una camisa exterior de 12.5mm – 7.5mm = **5mm**

### 3.2.3. Espaldones

Los espaldones situados a ambos extremos del tablero serían el tercer elemento estructural que interviene en la relación de la estructura con el terreno.

La normativa sueca TRVR Bro 11 en el epígrafe B.3.2.2.3 establece que la deformación necesaria para movilizar el empuje pasivo deberá ser:

$$\delta = \frac{h_{\text{espaldón}}}{200}$$

Partiendo de esta premisa somos capaces de establecer una relación F-  $\delta$  que define la interacción entre el tablero y el terreno en su trasdós, pudiendo establecer la altura necesaria para el espaldón y controlar las limitaciones de movimientos establecidas por la normativa.

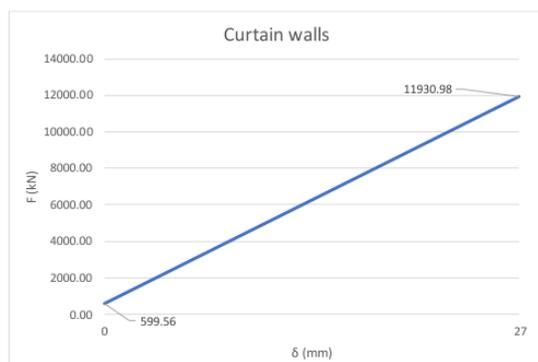


Figura 6. Relación F- $\delta$  espaldón

### 3.3 Diseño Pila-Pilote

La correcta definición de las Pilas-Pilote es uno de los detalles fundamentales del presente diseño. Tal y como se ha descrito anteriormente se trata de elementos de gran esbeltez que requerirán un estudio pormenorizado.

Para el cálculo de la capacidad estructural de las Pilas – Pilote se han tenido en cuenta la no linealidad de los materiales, así como los efectos de segundo orden.

Una vez obtenidos los esfuerzos del análisis lineal del modelo completo de la estructura, se desarrolla un modelo aislado de cada pila considerando:

- Diagrama tensión-deformación no lineal y sección fisurada
- Efectos de 2º orden (equilibrio estado deformado y fluencia)
- Tolerancias geométricas (desvío en planta y en alzado)

Los desvíos en planta y alzado respecto a la posición teórica de los pilotes y las consecuentes excentricidades en la aplicación de las cargas se toman como:

- Desvío en planta (SS EN 1536, 8.1.1.1):
  - $e_1 \leq e_{\max} = 0.10\text{m}$ , para pilotes de:  $D \leq 1,0\text{m}$
  - $e_1 \leq e_{\max} = 0.10 \times D$ , para pilotes de:  $1,0\text{m} \leq D \leq 1,5\text{m}$
- Desvío en alzado (SS EN 1992-1-1 5.2 (7)) se considera una excentricidad adicional  $e_2$ :
  - Máxima inclinación esperada:  $\theta_i \leq 2\%$
  - Para elementos aislados:  $e_2 = \theta_i l_0 / 2 < \theta_i (0,75 \times 1) / 2 = 0.0075 l_0$

(\*se ha redondeado al alza  $l_0$  ya que el análisis aislado de la  $\beta$  de pandeo para cada pila arroja un valor máximo de 0.748)

### 3.3.1. Esfuerzos de primer orden

Esfuerzos de 1<sup>er</sup> orden obtenidos del modelo global con geometría ideal

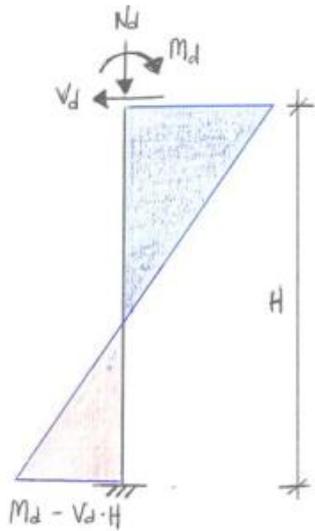


Figura 7. Esfuerzos de primer orden

### 3.3.2. Excentricidades ( $e_1$ y $e_2$ )

La envolvente de esfuerzos debida a las excentricidades anteriormente expuestas tendrá la siguiente forma.

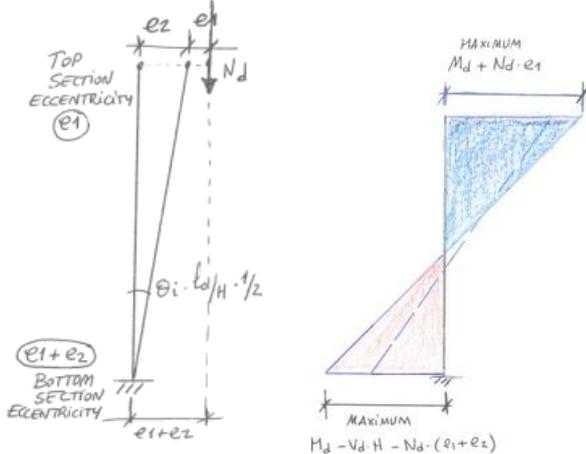


Figura 8. Esfuerzos por excentricidades

### 3.4 Conexión Pila-Pilote con Tablero

La conexión entre subestructura y superestructura es uno de los detalles constructivos más delicados del proyecto.

Con el fin de dotar de cierta flexibilidad al montaje del armado en la zona de unión se dispone de una junta de construcción en el pilote a una distancia desde coronación igual a la

longitud de solape de la armadura de mayor diámetro.

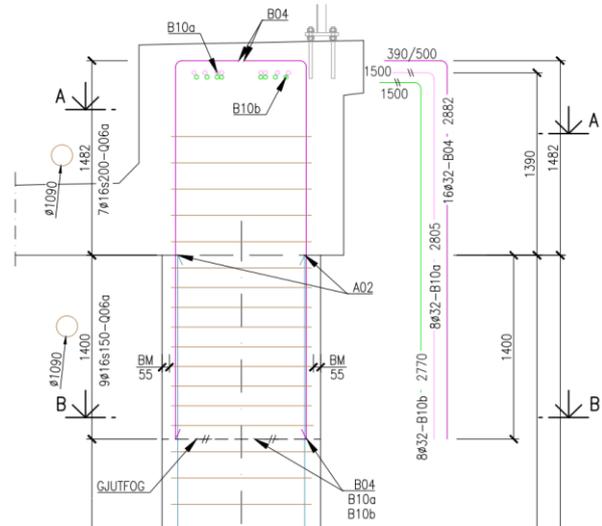


Figura 9. Detalle armado conexión

Esto permite abordar el armado del tramo final del pilote que habrá que enhebrar con el armado activo y pasivo del tablero desde la cimbra de la superestructura.

Otro condicionante que complicaba aún más la ejecución de dicha conexión era el requisito por parte de la administración de solapar las armaduras en tensión del pilote con la armadura pasiva superior del tablero.

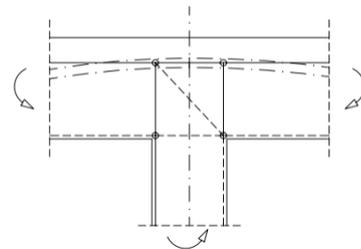


Figura 10. ByT detalle armado conexión

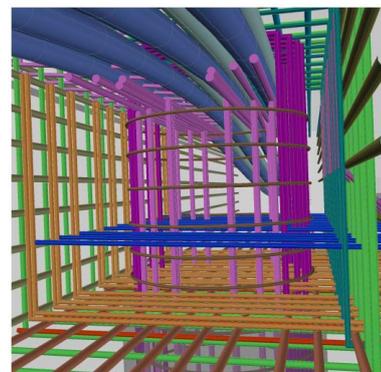


Figura 11. Detalle armado conexión

## 4. Ejecución

### 4.1 Pila – Pilote

La ejecución de los pilotes presenta las siguientes dificultades que habrá que solventar para materializar la subestructura proyectada:

- Traspasar el relleno de escollera vertida sobre la roca de fondo
- Materializar una longitud mínima de empotramiento del pilote de manera efectiva en una roca de gran dureza.

Como respuesta a los condicionantes enumerados, se deciden utilizar pilotes RD<sup>®</sup> [2] (tecnología patentada por SSAB), especialmente indicados para ser instalados en condiciones complicadas de terreno y ambiente.

El pilote consiste en un tubo de acero soldado, longitudinalmente o en espiral, en cuya cabeza actúa el útil de perforación trabajando a rotoperCUSión y que sirve de elemento de contención de las paredes de excavación durante la perforación. Dentro de este tubo de acero se montará el pilote de hormigón armado.

Permite perforar cualquier tipo de terreno minimizando los desvíos en planta e inclinación, condición indispensable para la obra que nos ocupa.



Figura 12. Detalle Pilote RD

Los rendimientos de perforación disminuyen significativamente al llegar a la roca de fondo. Sin embargo, se consiguen rendimientos de trabajo muy competitivos gracias al sistema elegido. Las velocidades de perforación se reducen desde unos excelentes 300 cm/h a unos no menos interesantes 70 cm/h al llegar al lecho rocoso.



Figura 13. Imagen Pilote RD

Con el fin de asegurar el empotramiento del pilote en la roca se han definido las siguientes longitudes teóricas de penetración en roca.

- Pilote de 1200mm 3m
- Pilote de 800mm 2m

Sin embargo, con el fin de asegurar el contacto entre el pilote y la roca y por tanto, el correcto funcionamiento como empotramiento de la conexión se decide alargar la perforación un mínimo de 4 metros en roca para ambos diámetros.

De tal manera que, una vez alcanzado el fondo de la perforación, se eleva la camisa 3 metros respecto a esta posición para permitir un contacto directo entre roca y hormigón.

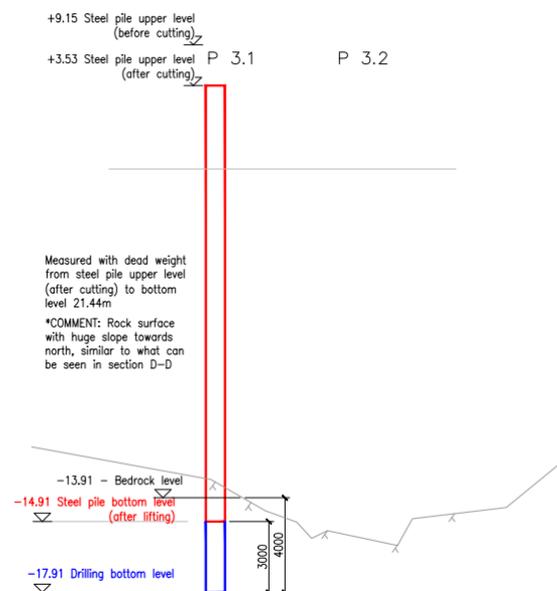


Figura 14. Plano Pilote ejecutado

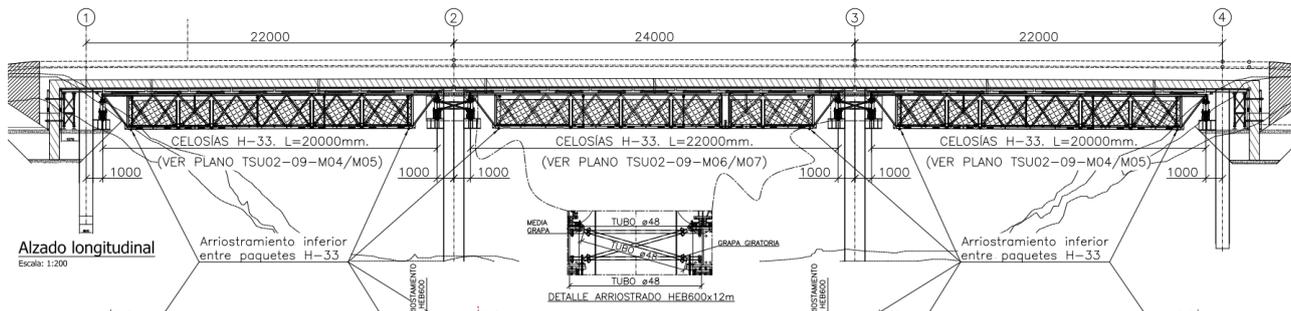


Figura 15. Alzado Proyecto Cimbra

#### 4.2 Apoyo de cimbra del tablero

Una vez instaladas las pilas pilote, con pilotadora para estribos y con barcaza para las alineaciones centrales sobre el cauce, se presenta otra de las ventajas de nuevo diseño desde el punto de vista constructivo.

Las pilas se utilizarán como punto de apoyo de la cimbra sobre la que se ejecutará el tablero.

Se diseñan unas ménsulas cuya cara superior se situará 1.6m por debajo de coronación sobre la que apoyarán los gatos que sustentarán esta cimbra.

En los apoyos extremos tan sólo hará falta una ménsula en cara interior respecto al cauce,

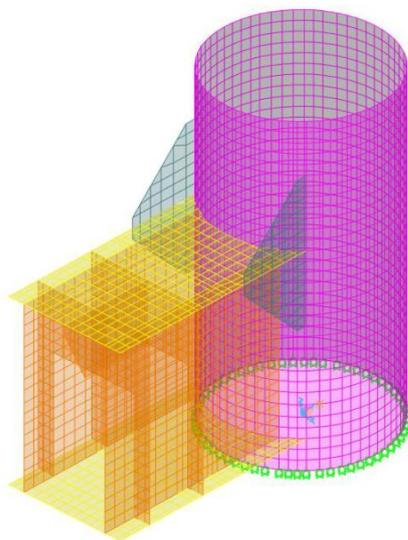


Figura 16. MEF ménsula-camisa lateral

Mientras que para los apoyos centrales se colocarán 2 ménsulas alineadas longitudinalmente y 4 perfiles para colocar una plataforma de trabajo bajo ellas.

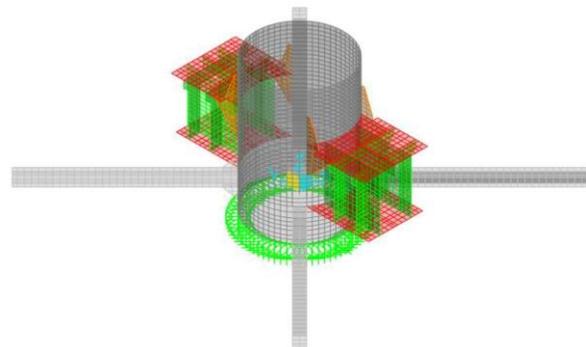


Figura 17. MEF ménsula-camisa central

En el análisis de elementos finitos se busca analizar el estado tensional del elemento temporal adosado a los pilotes, así como su influencia sobre el elemento estructural permanente.

El objetivo debe ser no dañar la camisa del pilote por lo que se buscan mantener las tensiones en el conjunto pilote-ménsula por debajo del límite elástico para todas las combinaciones de acciones analizadas.



Figura 18. Imagen ménsula pila extrema



Figura 19. Imagen ménsula pila central

## 5. Conclusiones

Las modificaciones introducidas respecto al diseño original, pese a las reticencias iniciales de la administración, han permitido diseñar y construir una estructura cuyas mejoras han repercutido en minimizar costes de ejecución y mantenimiento y en reducir el impacto ambiental sobre el entorno.

El mantenimiento de los aparatos de apoyo y las juntas de dilatación suponía un serio problema que no había sido previsto en el diseño original y la estructura integral ejecutada resuelve de manera intrínseca dicha contingencia.

La solución estructural proyectada y posteriormente ejecutada pone de manifiesto la importancia de apoyarse en tecnología específica local que permita resolver casuísticas que a priori no tendrían solución con las técnicas constructivas habituales.

Se ha explorado una solución que desbordaba las recomendaciones normativas vigentes, lo que va a permitir replantear dichos límites e igualmente, incorporar a la ingeniería estructural viaria técnicas constructivas ya existentes en el mercado.

## 6. Referencias

- [1] TRVK Bro 11 (2011:086), Annex 105, Trafikverket, Suecia
- [2] RR® and RD® piles. Design and installation manual. ([www.ssab.com/infra](http://www.ssab.com/infra))
- [3] BVH 583.20 Broprojektering, Handbok, Banverket, 2007