

# Red Line South. Metro de Doha (Qatar). Estructuras singulares construidas in-situ de ancho o canto variable

*Red Line South. Doha Metro (Qatar). Complex cast-in-situ structures*

Jordi Revoltós Fort<sup>a</sup>, Javier Antón Díaz<sup>b,\*</sup>, Silvia Criado Catalina<sup>b</sup>,  
Juan Miguel Cereceda Boudet<sup>b</sup> y Manuel Palomo Herrero<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ingeniero de Caminos SENER, Jefe de la Sección de Puentes y Viaductos, Madrid, España

<sup>b</sup> Ingeniero de Caminos SENER, Sección de Puentes y Viaductos, Madrid, España

Recibido el 30 de marzo de 2017; aceptado el 18 de abril de 2017

Disponible en Internet el 7 de junio de 2017

## Resumen

La Línea Roja Sur del Metro de Doha discurre elevada en viaducto en su mayor parte. Aunque se planteó como una sucesión de vanos tipo de fácil prefabricación, otros condicionantes obligaron a tramos complejos. Esto dio lugar a estructuras construidas in situ, unas de ancho variable (tanto isostáticas como continuas de 3 vanos) y otras de canto variable para alcanzar hasta 59 m de luz en doble vía y 75 m de luz en vía simple. De todas ellas, la estructura más compleja fue la de doble vía, pues presenta varios mecanismos resistentes complementarios, cuya aportación al comportamiento global depende de la relación de rigideces entre dichos mecanismos resistentes.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

*Palabras clave:* Ancho variable; Metro; Sección abierta; Canto variable; Estructura evolutiva

## Abstract

The Doha Metro Red Line South runs on a viaduct along most of the line. At the beginning, the design consisted of typical precast spans, but external constraints made complex structures necessary. For this reason, several cast in-situ bridges were built. Some of them have variable width (either simply-supported decks or continuous ones up to three spans), whereas other bridges are of variable depth, so they can reach 59 m for a double track section and 75 m for single track. The most complex bridge is the variable-depth one for the double track railway because the structural behaviour depends on several resistant mechanisms.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

*Keywords:* Variable width; Metro; Open section; Variable depth; Staged structure

## 1. Introducción

La Línea Roja Sur (RLS) del Metro de Doha conecta el sur de la ciudad de Doha con el norte de Al-Wakra. La RLS tiene aproximadamente 6.500 m de longitud y discurre elevada en viaducto en la mayor parte de su recorrido. Incluye 3 estaciones y

el acceso a los talleres del metro. La línea discurre por la mediana de Al Matar Street, carretera que conecta Doha y Al-Wakra y que se encuentra muy congestionada habitualmente. Además, cruza vías de gran importancia, como F-Ring, una vía de alta capacidad que une la ciudad con el aeropuerto internacional (fig. 1).

El hecho de ser la conexión de la red de metro con los talleres tiene gran importancia puesto que cualquier retraso en la ejecución de los trabajos implicaba demoras en la puesta en servicio de los tramos restantes. Es por ello que el diseño y la construcción se han desarrollado en un tiempo inferior a 2

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [janton@sener.es](mailto:janton@sener.es) (J. Antón Díaz).



Figura 1. Vista aérea (tomada de Google Earth).

años y medio, lo que ha supuesto un enorme reto para el equipo involucrado.

Las obras fueron adjudicadas a la UTE formada por FCC, Yuksel, Archidoron y Petroserv (FYAP) con el proyecto de licitación redactado en 2013 por la UTE SENER-TYPSA. SENER fue la responsable del viaducto y TYPSA de las 3 estaciones. Estas mismas empresas fueron las encargadas del diseño detallado con la misma distribución de trabajos, así como de la asistencia técnica a obra.

La RLS se ha construido para doble vía. La presencia de las cocheras del metro y de las estaciones ha dificultado el diseño del viaducto pues son necesarios numerosos cambios de vía para permitir todos los movimientos y ello exige a veces estructuras continuas sin giro relativo y otras veces estructuras con variación de ancho.

Puesto que el plazo de ejecución era crítico, se optó por prefabricar los tableros y dinteles en su mayor parte. En otros casos se recurrió a estructuras in situ bien por ser de ancho variable (para adaptarse a los cambios de vía), o bien por ser de gran luz donde la alternativa de viaductos de voladizos por dovelas prefabricadas no era competitiva en tiempo y requería medios auxiliares de mayor envergadura.

## 2. Descripción de las estructuras

Todos los tableros de la RLS presentan la sección transversal en forma de U, de modo que los trenes circulan por el interior y los pasillos de evacuación se encuentran al nivel de las puertas de los vagones (fig. 2). Esta forma reduce la presencia de arena en la vía. El tipo de vía elegida fue vía en placa [1].

La mayor parte de los tableros se han construido prefabricados mediante dovelas de 4,0 m de longitud ejecutadas por

el método de la dovela conjugada [2]. El canto típico es de 2,20 m, excepto en las riostras de apoyo, donde se recrece la cara inferior 25 cm, hasta los 2,45 m. Con esta geometría se ha alcanzado de forma isostática hasta 32,0 m de luz para doble vía ( $c/L = 1/14,5$ ) y hasta 44,3 m con continuidad ( $c/L = 1/20,1$ ). Las alas superiores de la sección son de 1,30 m de ancho, pues se requieren 0,80 m para el pasillo de evacuación y 0,50 m para la colocación de las barandillas y barreras antirruído. Las almas son de 31 cm de espesor y la losa inferior presenta 37 cm en el eje, con un bombeo del 2% a cada lado.

Los tableros prefabricados son de 3 tipos diferenciados:

- Tableros simplemente apoyados fabricados por dovelas para doble vía, bien de 10,62 m de ancho (separación de vías de 4,0 m), o bien de 12,12 m de ancho (separación de vías de 5,5 m) alcanzando luces de hasta 32 m.
- Tableros continuos fabricados por dovelas para doble vía análogos a los anteriores alcanzando luces de hasta 44,3 m y 4 vanos continuos con el mismo canto de 2,20 m (fig. 3). La continuidad se empleó en aquellos casos donde se requerían luces mayores de 32,0 m para doble vía pues al tener que mantener la sección invariable para aprovechar los encofrados de los vanos tipo, la deformabilidad ante el paso de la sobrecarga era inadmisibles y los giros relativos entre tableros isostáticos superarían los límites permitidos. También se emplearon tramos continuos para situar aparatos de cambio de vía, más largos que un vano aislado y que no permiten giros relativos para el correcto funcionamiento del aparato.
- Tableros simplemente apoyados fabricados en full-span de 6,05 m de ancho para vía simple alcanzando luces de hasta 36 m.



Figura 2. Sección transversal en U para vanos prefabricados.



Figura 3. Montaje del vano de 44,3 m de luz sobre F-Ring.

Al aparecer estructuras singulares, estas mantienen, en la medida de lo posible, las mismas formas que los tableros tipos. Como los tableros de ancho variable, para alojar bifurcaciones de vía, son de luces moderadas (hasta 32 m), permiten mantener las mismas formas que los prefabricados pues el canto disponible (2,20 m) es suficiente para resolver la estructura, si bien con la complejidad inherente de las dimensiones cambiantes.

Sin embargo, ha sido necesario realizar vanos de hasta 75 m de luz, por lo que no es posible salvar tales obstáculos manteniendo el canto de 2,20 m. En estos casos se requerían cantos mayores que deben integrarse en la forma en U para el paso del tren.

### 3. Tableros in situ de ancho variable

Los tableros que requieren variación de ancho se han construido in situ, pues adaptar el sistema de prefabricación para estos casos puntuales suponía un coste innecesario o, simplemente, era inviable. Entre los tableros de ancho variable existen 2 tipos.

En primer lugar, los que no presentan bifurcaciones ni cambio de vía y simplemente permiten que las vías se separen entre sí. Estos se han construido isostáticos (figs. 4 y 5).

En segundo lugar, los que alojan cambios de vía y/o bifurcaciones, donde los aparatos de vía ocupan longitudes mayores que un vano y no pueden tener giros relativos en apoyos. En estos casos se ha recurrido a estructuras continuas.

Estos últimos son los más complejos pues en algunos casos el ancho varía de 6,0 m (para vía simple) a 11,0 m (para vía doble) en tan solo 80 m de largo. Existen 2 tramos con estas peculiaridades, de luces 20 + 32 + 32 y 28 + 24 + 24. Como puede verse, se trata de puentes muy mal compensados para ser continuos; sin embargo, no pudieron cambiarse las luces por existir servicios afectados (fig. 6).

Estos tableros se han estudiado con modelos tridimensionales, pues la analogía de la barra única no representaba adecuadamente todos los efectos estructurales. Se emplearon modelos tanto de emparrillado como de elementos finitos (fig. 7). En los primeros se realizó el estudio longitudinal y en los segundos, el cálculo transversal.

El proceso constructivo de estos viaductos fue relativamente sencillo, pues era posible su cimbrado al suelo, hormigonado y tesado en una única fase de los 3 vanos (fig. 8). Lógicamente, estos tramos continuos debían terminarse antes de colocar los vanos adyacentes prefabricados, para poder tesar por ambos frentes. De esta forma, estos puentes condicionaban el camino crítico de la obra.



Figura 4. Vano cimbrado isostático de ancho variable.



Figura 5. Vista interior del vano.

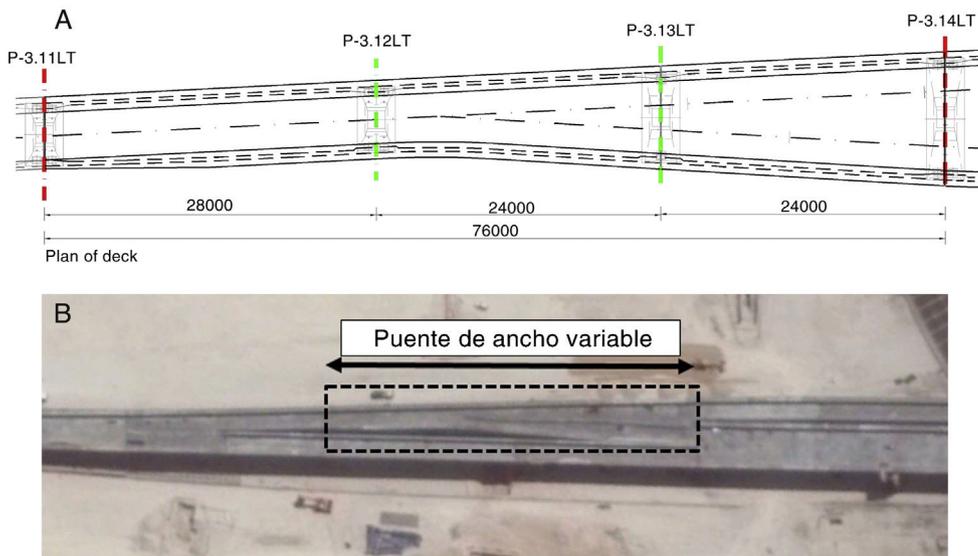


Figura 6. Vista superior de un tablero de ancho variable de 3 vanos. A) Plano y (B) estructura terminada.

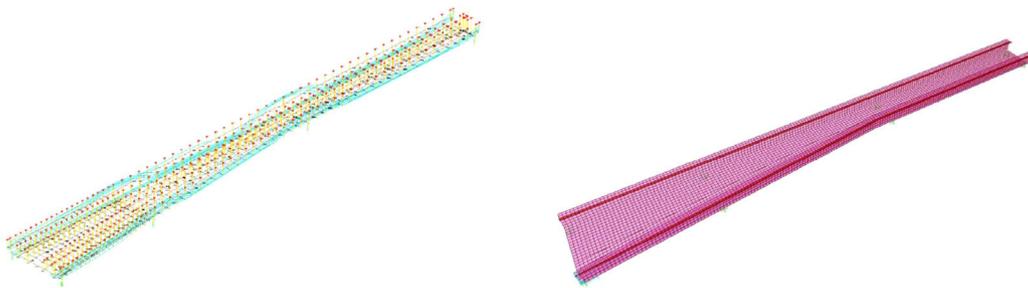


Figura 7. Modelos empleados. Emparrillado y elementos finitos.



Figura 8. A) Labores de ferrallado. B) Frente de tesado de un puente in-situ.

#### 4. Tableros in situ de canto variable

En aquellos casos donde los vanos prefabricados, de hasta 44 m de luz en los casos continuos, no eran suficiente para salvar los obstáculos, fue preciso el empleo de puentes de mayores luces con secciones transversales más complejas desde el punto de vista geométrico y estructural, puesto que a la sección en forma de U se añadía un cajón cerrado por la parte inferior de la sección de canto variable.

Se han realizado 3 puentes de canto variable:

- 42,0 + 75,0 + 47,0 para vía simple.
- 44,0 + 75,0 + 45,0 para vía simple.
- 33,0 + 58,6 + 50,9 + 37,5 para vía doble.

Como todos los tableros de la línea se encuentran sobre apoyos de neopreno zunchado, fue necesario un cálculo no lineal de interacción vía-estructura para su dimensionamiento por cargas horizontales. Se realizó un modelo de cálculo no lineal de todo el viaducto de la línea y, mediante un proceso iterativo, se definieron los apoyos y se comprobaron todos ellos conforme al Eurocódigo EN 1337 [3] junto con las comprobaciones propias de la vía en tensiones y movimientos relativos [4]. Este cálculo sirvió para ver la necesidad de aparatos de dilatación de vía en el caso de los viaductos continuos largos. En una primera fase de proyecto se tomaron las propiedades no lineales de las fijaciones

acorde a la normativa UIC [5], que supone unas fijaciones muy rígidas para la vía en placa. El resultado fue la necesidad de disponer aparatos de dilatación de vía en los extremos de los 3 puentes de canto variable (y algún otro puente continuo prefabricado mediante dovelas). La presencia del contratista de vía modificó las condiciones y propuso unas fijaciones distintas y más reales, variables en rigidez de unas zonas a otras. En concreto, propuso el empleo generalizado de rigideces con una resistencia al deslizamiento de 7 kN, excepto las 3 primeras fijaciones a cada lado de una junta de tablero que presentaban una resistencia de 10 kN y las zonas de aparatos de vía, con una resistencia de 13 kN (tabla 1). Por tanto, solo en estos casos la rigidez adoptada era coincidente con la que define la UIC de forma general y en todos los demás vanos las fijaciones eran más flexibles. El resultado de este segundo análisis, más real, fue que los aparatos de vía ya no eran necesarios puesto que se cumplían todas las condiciones de vía. Lógicamente, se comprobaron nuevamente todos los apoyos realmente dispuestos, siendo válidos.

Las rigideces indicadas en la ficha UIC 774-3 garantizan que ante la posible rotura del carril, la abertura del mismo esté controlada evitando el descarrilamiento. Por tanto, el empleo de fijaciones más flexibles lleva aparejada la necesidad de comprobar las aberturas esperadas en caso de rotura del carril. Esta comprobación fue llevada a cabo por el contratista de vía.

Tabla 1  
Comparativa de las rigideces de las fijaciones de carril

Origen de los datos	Condición de carga	Resistencia de la vía al deslizamiento [kN/m]		
		En todo el viaducto de forma general	Tres primeras fijaciones a cada lado de una junta de tablero	Aparatos de vía
UIC 774-3 (proyecto)	Vía descargada	40,0	40,0	40,0
	Vía cargada	60,0	60,0	60,0
Contratista de vía (ejecución)	Vía descargada	21,6	30,8	40,0
	Vía cargada	60,0	60,0	60,0

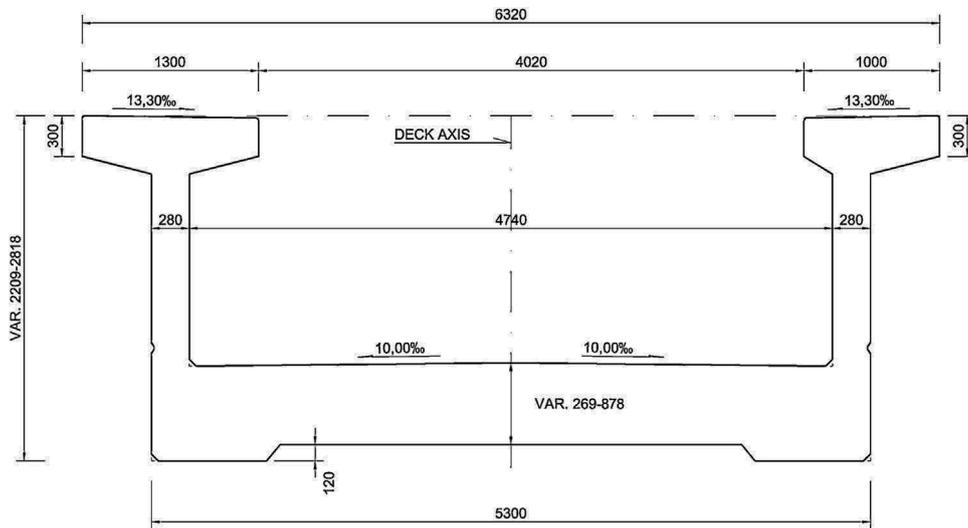


Figura 9. Sección sin cajón descolgado.

#### 4.1. Tableros de vía simple

Los 2 tableros de vía simple son muy similares, tanto en luces como en trazado, inscritos en curvas en planta de 200 m de radio. La sección transversal es de 6,32 m de ancho entre bordes exteriores con una losa inferior de 5,3 m de ancho.

En los extremos presenta 2,20 m de canto con sección en U, manteniendo la continuidad de formas con los vanos adyacentes prefabricados (fig. 9).

Para alcanzar las luces propuestas de 75 m, se descuelga un cajón de 5,3 m de ancho (igual a toda la losa inferior) alcanzando un canto total de 5,8 m (fig. 10).

El comportamiento estructural de la sección transversal se divide en:

- Flexión y cortante: responde con el canto total.
- Torsión: responde con la sección cerrada en cajón, si bien este no tiene todo el canto. En los extremos del puente, donde el cajón descolgado aún no ha aparecido, el comportamiento es el de la sección en U con una torsión no uniforme. Dada la enorme flexibilidad de esta sección frente a torsión y la gran rigidez del cajón, prácticamente toda la torsión de los vanos laterales se concentra en los apoyos intermedios.

Del estudio que se realizó, se concluyó que las fases de construcción marcaban enormemente la distribución final de tensiones. La configuración habitual de construcción vano a vano donde se avanza de un extremo hacia el otro completando un vano más un quinto o un cuarto del siguiente provocaba una

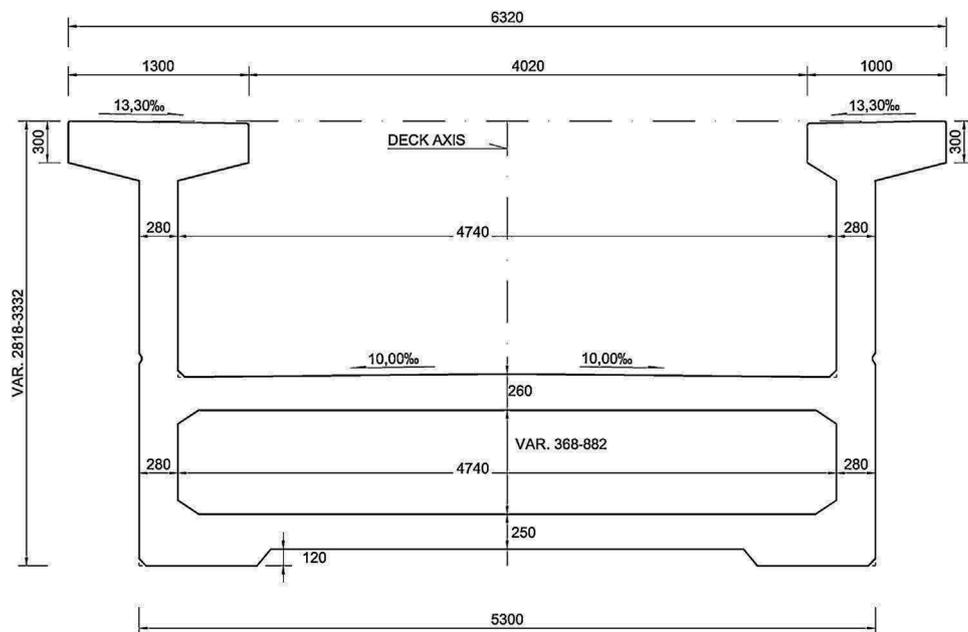


Figura 10. Sección con cajón descolgado.



Figura 11. Vista frontal del puente en construcción.

asimetría en el proceso constructivo que no permitía eliminar las tracciones. Por ello, se optó por una construcción totalmente simétrica, donde en primer lugar se construyeron los vanos laterales y una fracción del vano central, para finalmente construir el resto del vano central. En la [Figura 11](#) se observa cómo están ejecutados los vanos laterales mientras que se está ferrallando el tramo central.

Este esquema dificultaba el pretensado de la última fase, puesto que los únicos frentes de tesado eran los extremos del puente y las cuñas dispuestas en el interior del cajón. El esquema final de pretensado se muestra en la [Figura 12](#).

Se han empleado 4 familias de pretensado, 3 horizontales y una parabólica: de las 3 horizontales, la superior discurre horizontal por las cabezas superiores, la inferior discurre paralela a la cara inferior del tablero (en la losa inferior) y la intermedia discurre horizontal por la tabla media ([fig. 13](#)).

La familia parabólica discurre por las almas entre la losa media y las cabezas superiores, adaptándose a la variación del momento flector. Los 4 cables parabólicos en cada alma van de un extremo a otro del puente y presentan un acoplador en la unión de una fase lateral con la fase central: 2 cables se acoplan en la primera junta de construcción y los otros 2 en la segunda junta, de

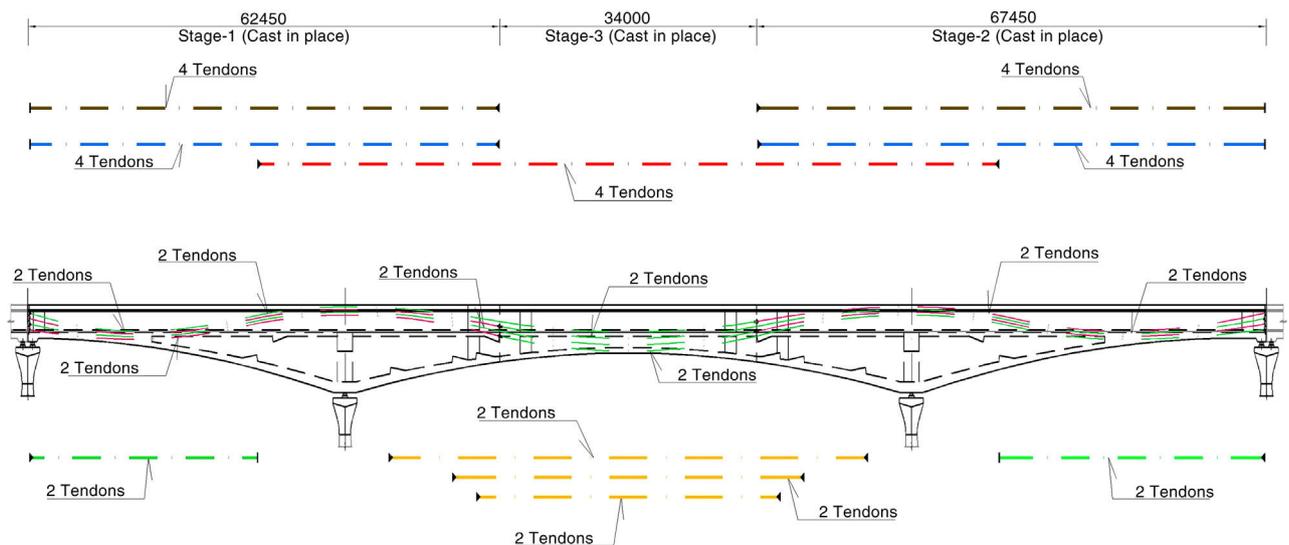


Figura 12. Familias de pretensado.



Figura 13. Cables desde extremo del puente.

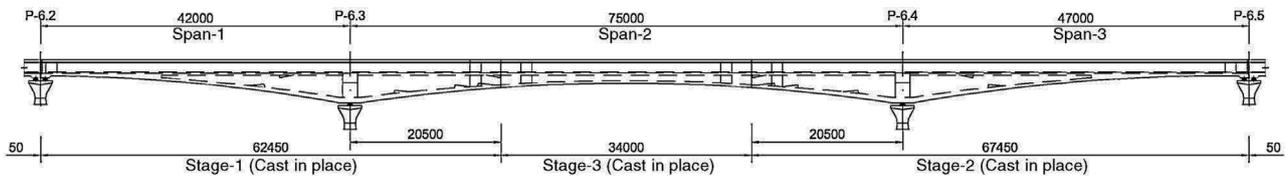


Figura 14. Alzado del modelo de cálculo.

tal forma que en las fases iniciales únicamente se tesan 2 cables de los 4. Este esquema de pretensado, nada trivial, garantiza la ausencia de tracciones en combinaciones frecuentes de servicio, necesarias para el ambiente agresivo en que se encuentra la obra.

#### 4.2. Tableros de vía doble

El cruce de la línea sobre un corredor de servicios obligaba a disponer una luz próxima a 60 m. Con la sección tipo definida de 2,20 m de canto era obviamente imposible de conseguir.

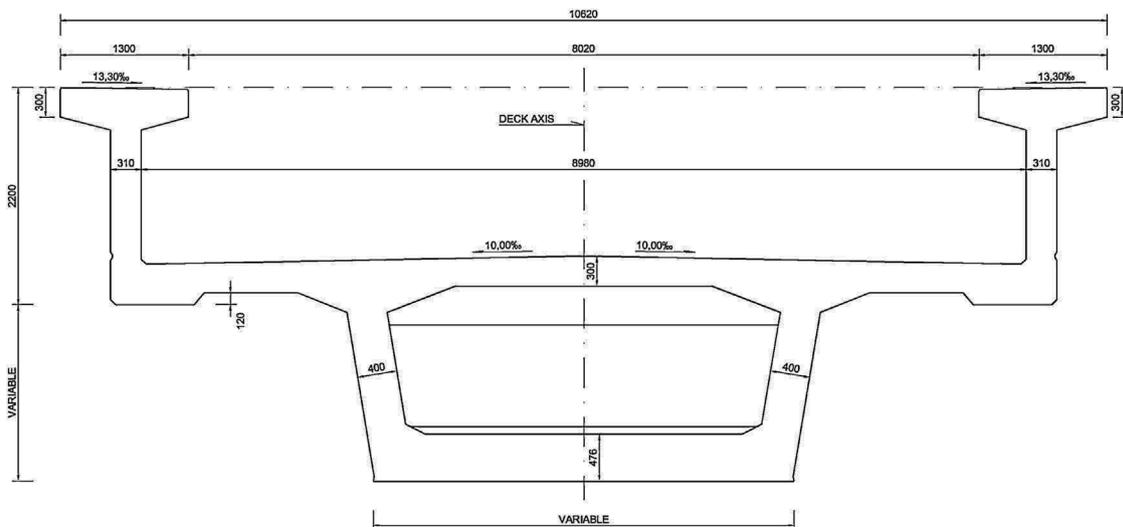


Figura 15. Sección transversal de tablero de doble vía.



Figura 16. Vista inferior mientras el launching gantry atraviesa el tablero.

Para ello, se propuso una sección de canto variable de luces  $33,0 + 58,6 + 50,9 + 37,5$  (fig. 14).

Al ser doble vía, con ancho de tablero de 10,62 m y losa inferior de 9,60 m, era poco recomendable descolgar un cajón de tal ancho pues sería muy pesada. Además, esta estructura cruza por encima de la carretera de Al Matar, de modo que la línea férrea se inserta en la mediana de dicha vía de comunicación y es fuertemente visible. La solución fue descolgar un cajón de 4,40 m de ancho hasta conseguir un canto total de 5,0 m. (fig. 15).

El comportamiento estructural de esta sección híbrida es sumamente complejo, pues depende de la relación de rigideces de los 2 componentes de la sección (fig. 16):

- Flexión y cortante: responde con el canto total de la sección, si bien ello obliga a que la tabla media transmita el rasante desde las almas del cajón a las almas exteriores.
- Torsión: responde por los 2 sistemas presentes: sección cerrada inferior y sección en U superior. La relación entre ellos depende de las dimensiones del cajón inferior, que son variables por la variación de canto.

El estudio del comportamiento estructural se hizo mediante modelos de elementos finitos del puente completo pues el reparto entre ambos mecanismos resistentes varía de un punto a otro al cambiar las dimensiones del cajón inferior (fig. 17).

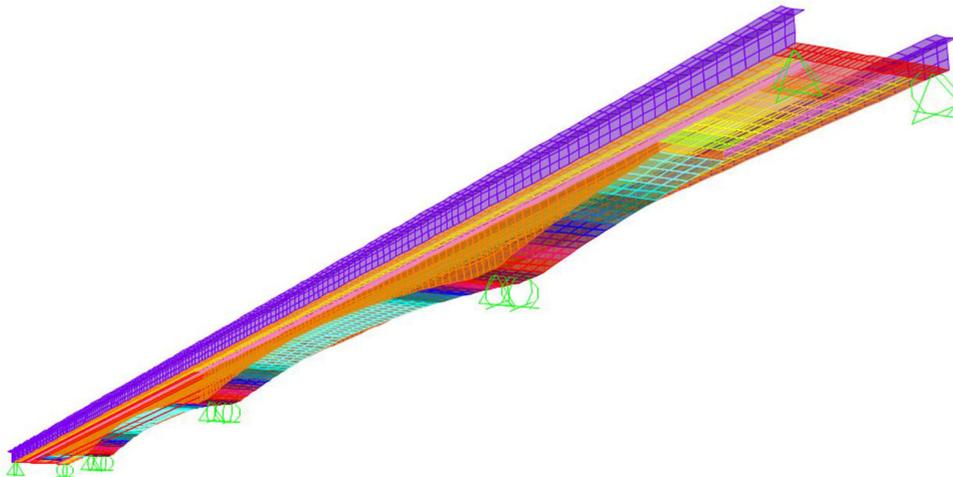


Figura 17. Modelo de elementos finitos.

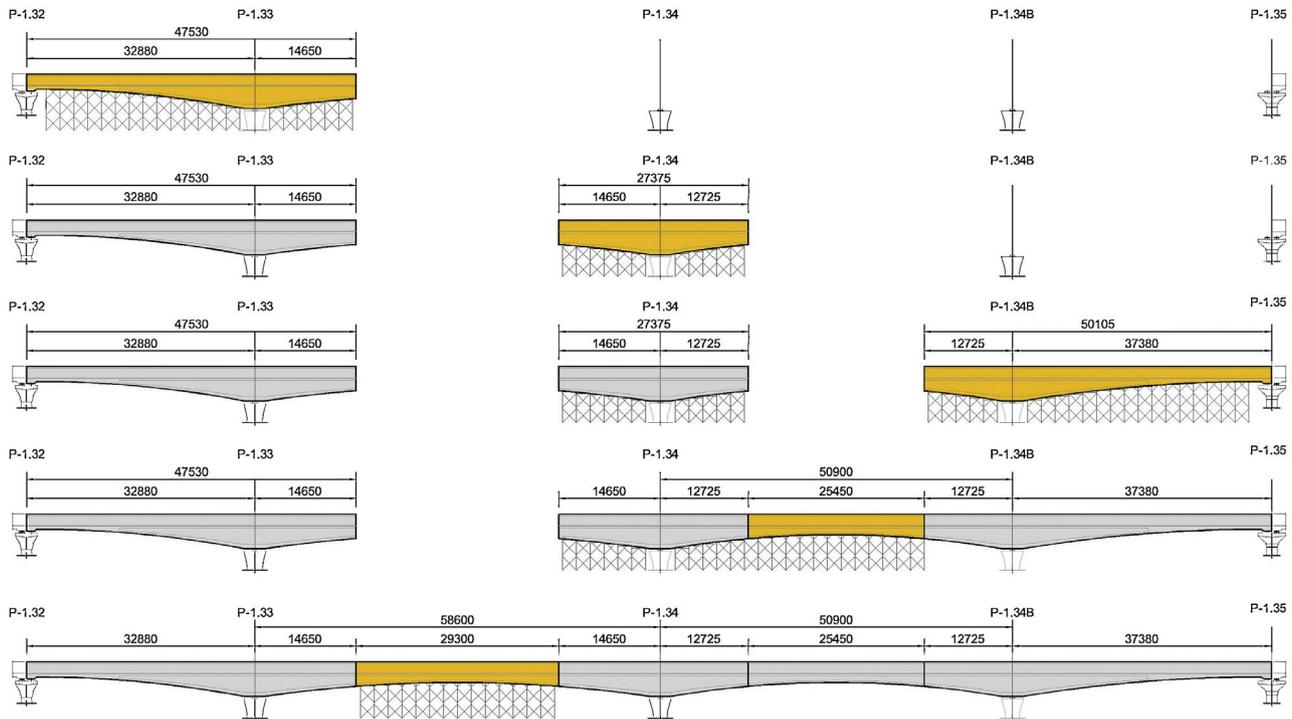


Figura 18. Fases constructivas.

El proceso constructivo siguió las lecciones aprendidas de los tableros de vía simple, donde se buscaba la máxima simetría posible. Las fases se muestran en la [Figura 18](#).

## 5. Conclusiones

Aunque la Línea Roja Sur del Metro de Doha se planteó como una sucesión de vanos tipo de fácil prefabricación, otros condicionantes obligaron a tramos complejos, de ancho variable o a mayores luces. Se optó por economía y tiempo de ejecución en realizar estas estructuras singulares in situ. El reto fue adaptar las formas de los vanos tipo, con secciones en U, a las nuevas estructuras.

La mayor complejidad fueron las secciones de canto variable, híbridas con cajones cerrados inferiores y una parte superior en U, donde la participación de cada mecanismo resistente en la respuesta global de la estructura depende de la relación de rigidez de cada subsistema, siendo estas variables al cambiar el canto de la sección.

## Agradecimientos

Además de los autores del presente artículo, el proyecto ha sido posible gracias a muchas personas de la Sección de Puentes

y Viaductos de SENER, anteriormente EIPSA. En particular, los autores quieren agradecer la colaboración de Francisco José Fernández Corzo, Juliana Fernández, Joao Ribeiro, Joaquim Cardoso y José Ignacio González Esteban. Los autores quieren igualmente agradecer la labor de José Antonio Alvarado, director del proyecto.

## Bibliografía

- [1] J. Revoltós, J. Antón, S. Criado, J.M. Cereceda, M. Palomo, Red Line South. Metro de Doha (Qatar). Estructuras prefabricadas ejecutadas mediante dovelas y método full-span, VII Congreso ACHE, 2017.
- [2] J.I. González, *Construcción de viaductos de dovelas prefabricadas*, Jornadas «La vida de los puentes», San Sebastián, 2005.
- [3] Structural bearings. Part 3: Elastomeric bearings. EN 1337-3:2005.
- [4] Eurocode-Basis of structural design. EN 1990:2002 + A1:2005.
- [5] Track/bridge interaction recommendations for calculations. UIC Code 774-3.