

Puentes de luces no convencionales para monorraíl

Non-standard bridges for monorail

Jordi Revoltós Fort^a, Javier Antón Díaz^b, Ignacio Pita Olalla^c, Silvia Criado Catalina^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility. Jefe de Disciplina de Puentes y Viaductos. jrevoltos@mobility.sener

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility. Disciplina de Puentes y Viaductos. janton@mobility.sener

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility. Disciplina de Puentes y Viaductos. Ignacio.pita@mobility.sener

^d Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. silviciado@gmail.com

RESUMEN

Sener ha desarrollado en los últimos años varios proyectos de monorraíl. Hasta luces de 30 m, la viga de rodaje es autoportante, reduciendo la estructura resistente a la mínima expresión. Cuando se requieren luces mayores la viga de rodaje necesita una estructura portante adicional. Desde 30 m hasta 60 m se han realizado tipologías de vigas prefabricadas bien isostáticas, bien con continuidad. En el monorraíl de El Cairo surgió la necesidad de diseñar dos puentes de 70 m de luz y otros dos de 124 m de luz. Analizando los condicionantes se optó para los puentes de 70 m de luz por celosías metálicas. En el caso de los puentes de 124 m de luz se optó por puentes arco con tablero inferior de hormigón.

ABSTRACT

Sener has developed in recent years several monorail projects. Up to 30m-span length, the guideway beam is self-resistant, reducing the structure to a minimum. When longer spans are required, the guideway beam needs an additional supporting structure. From 30 m to 60 m, prefabricated U-beam typologies have been designed, either simply-supported or continuous. For the Cairo monorail, the design of two 70 m span bridges and two 124 m span bridges was needed. After analysing the constraints, the 70 m span bridges were designed with steel trusses. In the case of the 124 m span bridges, arch bridges with a concrete deck were chosen.

PALABRAS CLAVE: monorraíl, arco, celosía, metal, viga de rodaje, pretensado.

KEYWORDS: monorail, bow-string, arch, truss, steel, guideway beam, post-tensioning

1. Visión general del proyecto

En el año 2019, la Autoridad Nacional de Túneles de Egipto (NAT) adjudicó a las empresas Orascom y The Arab Contractors la ejecución de dos líneas de monorraíl en la ciudad de El Cairo con el fin de mejorar la movilidad en una ciudad con grandes problemas de transporte. Aunque ambas líneas se encuentran dentro del mismo contrato, una línea ha sido construida enteramente por Orascom mientras

que la otra línea ha sido construida por The Arab Contractors.

La línea NCC (New Capital City) discurre al este del río Nilo y conecta el centro de El Cairo con New Cairo, una ampliación moderna de la ciudad donde la Administración está reubicando todos los edificios oficiales. Esta línea cuenta con 54 km de longitud y 22 estaciones. La línea 6 de octubre se encuentra al oeste del río Nilo y

conecta el centro de El Cairo con la ciudad 6 de octubre, cerca de Giza. Esta línea, de 42 km de longitud, tiene 13 estaciones. Ambas líneas no están conectadas entre sí pues las separa el río.

A finales de 2019, ambas empresas constructoras encargaron a Sener, Shaker e Innova la redacción del proyecto. El diseño del trazado así como de

las estructuras convencionales de monorraíl estuvo a cargo de Innova. El resto del diseño ha recaído en el consorcio Sener-Shaker. El alcance de Sener ha sido: estaciones y cocheras (arquitectura, estructura y geotecnia) y estructuras no convencionales de la línea (incluyendo geotecnia y diseño estructural).

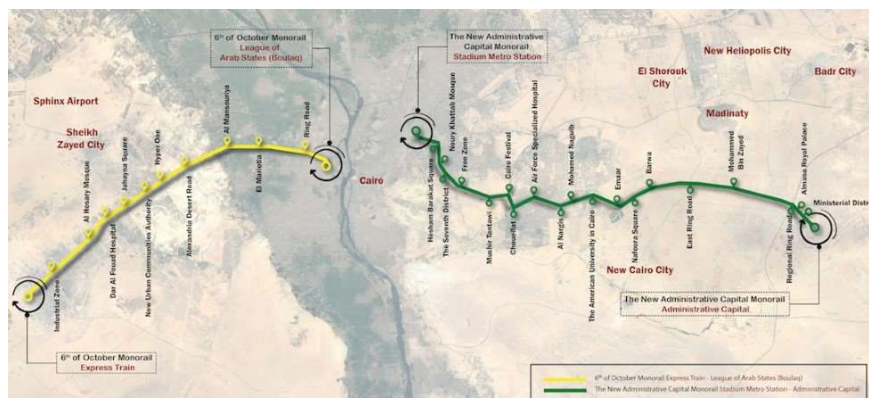


Figura 1. Localización de ambas líneas de monorraíl (<https://www.urban-transport-magazine.com/>).

2. Estructuras de monorraíl

El monorraíl es un tipo de transporte ligero que presenta la gran ventaja de que la construcción es rápida y de coste moderado. Los vehículos se desplazan rodando sobre una única viga que sirve tanto de guía al rodaje como de estructura resistente. En otras ocasiones el vehículo se encuentra suspendido. La economía de la solución se debe precisamente a que la estructura resistente es el mismo elemento que sirve de rodaje, sin necesidad de estructuras auxiliares. Para que esto sea posible, las estructuras convencionales de monorraíl no pueden sobrepasar los 30 ó 32 metros de luz. Con el fin de reducir el peso de las vigas se disponen de canto variable y se hacen monolíticas con la subestructura, para eliminar la necesidad de apoyos. Este esquema de continuidad y monolitismo puede ser inviable en zonas de alta sismicidad.

Esta disposición de luces es habitual cuando el monorraíl discurre por grandes avenidas ubicado en su mediana. Sin embargo,

en cruces la luz tipo de 30 metros puede resultar insuficiente. En estos casos, es preciso disponer estructuras auxiliares.



Figura 2. Estructura convencional en construcción.
Línea NCC

Para luces mayores de 30 m, Sener ha desarrollado, tanto en el monorraíl de El Cairo como en otros proyectos recientes (Línea 3 del monorraíl de Panamá y líneas 4 y 6 del monorraíl de Monterrey) estructuras prefabricadas formadas por dos vigas artesas conectadas por una losa que permite, además, disponer la pasarela de evacuación.

Cada viga artesa se dispone bajo una viga de rodaje que se conecta de manera monolítica,

aumentando de esta forma el canto de la estructura en fase de servicio.

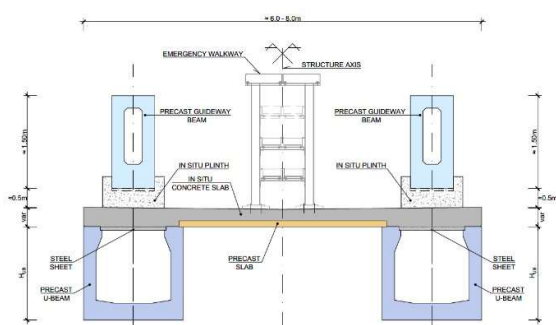


Figura 3. Sección tipo. Luces 30-60 m.

Esta unión presenta la ventaja no sólo de aumentar la capacidad a rotura, sino que se

mejoran las condiciones de servicio al reducirse las deformaciones.

En el monorraíl de El Cairo se ha empleado esta solución en configuración isostática de un vano para luces hasta 40 m de luz con vigas artesas de 1.50 m de canto, si bien en el monorraíl de Panamá se ha llegado a luces de 46 m con vigas de 1.70 m de canto. Para luces mayores de 40 m, Sener ha desarrollado soluciones continuas de tres vanos formadas por cinco vigas prefabricadas (dos vigas-martillo sobre pilas y tres vigas de canto constante en vanos). Con esta solución se han alcanzado 60 m de luz.

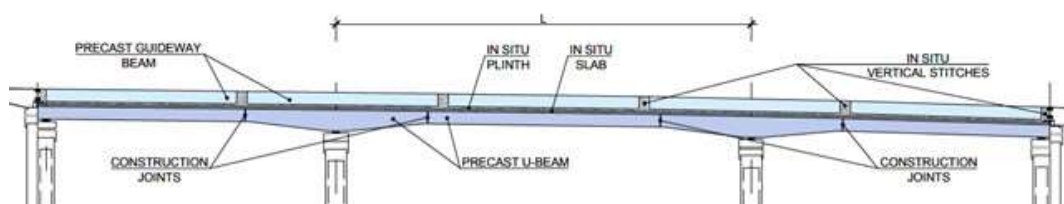


Figura 4. Esquema de viaducto continuo. Luz principal entre 40 y 60 m.



Figura 5. Viaducto continuo en construcción. Línea 6 de octubre

Para luces mayores a 60 m la opción prefabricada deja de ser ventajosa pues las vigas son muy pesadas y su transporte y colocación deja de ser convencional. En estos casos se ha recurrido a tipologías propias de puentes de luces medias o grandes.

En el proyecto del monorraíl de El Cairo surgió la necesidad de realizar cuatro estructuras grandes. Dos de ellas, situadas en la línea 6 de octubre, debían tener una luz del orden de 70 m. Las otras dos estructuras, situadas en la línea

NCC, debían superar los 120 m de luz para salvar el obstáculo.

Para cada emplazamiento se realizó un estudio de soluciones atendiendo a los requerimientos de cada empresa constructora. Finalmente se optó por una celosía metálica isostática para los emplazamientos de 70 m de luz y un arco de tablero inferior para los emplazamientos de 124 m de luz, como se describe a continuación.

3. Celosía metálica

En la línea 6 de octubre se han construido dos celosías de 70 m de luz. Una de ellas salva un corredor por el que discurren servicios. La otra estructura salva una autovía en un cruce fuertemente esviado. En ambas ubicaciones no era posible ocupar la sombra del puente para la construcción, pero la altura con la que discurre la línea permitió optar por diseñar la estructura metálica y colocarla mediante grúas en maniobras de corta duración.

Cada estructura está compuesta por dos celosías longitudinales de modo que se dispuso una celosía bajo cada viga de rodaje. Ambas estructuras discurren por un trazado recto, lo que facilitó la disposición de las celosías en dos planos paralelos, separados 4.80 m, misma separación que las vigas de rodaje.

Cada celosía metálica es de tipo Warren, tiene 4.50 m de canto y nudos cada 6.444 m. La luz entre eje de pilas es de 70 m, pero la luz entre ejes de apoyos de la celosía es de 64.44 m.

Tanto los cordones longitudinales como las diagonales así como los arriostramientos están formados por perfiles en H, a petición de la constructora.

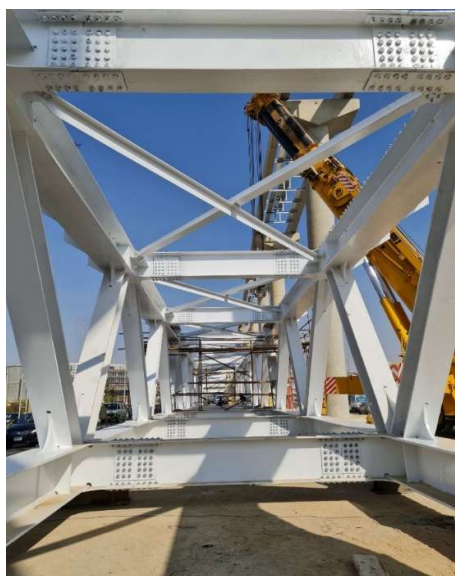


Figura 6. Celosía metálica en construcción

Las uniones en taller se hicieron soldadas. De esta forma, todos los nudos de encuentro de

los cordones con las diagonales y con los arriostramientos son soldados. A petición de la constructora, las uniones en obra debían ser atornilladas. Cada plano de celosía se transportó en tres piezas, de modo que hay dos uniones atornilladas en los elementos primarios (cordones y diagonales). También se atornillaron todos los arriostramientos.

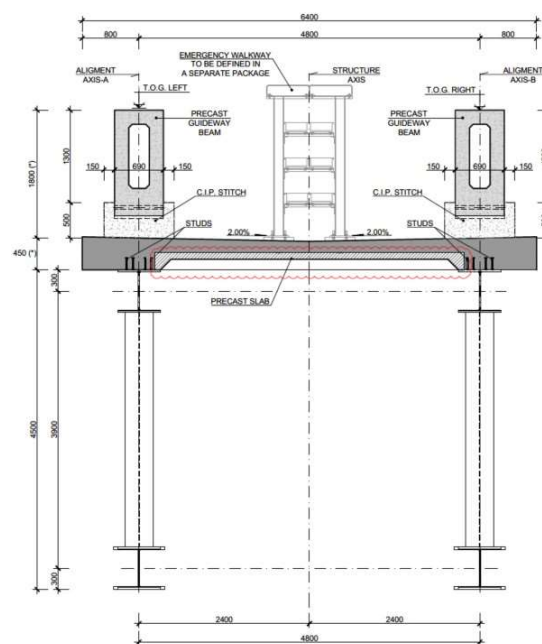


Figura 7. Sección tipo

La sección resistente final es mixta formada por: celosía metálica conectada a la losa hormigonada in situ sobre prelosa prefabricada y finalmente vigas de rodaje prefabricadas conectadas monolíticamente a la losa. Por tanto, en el análisis de la estructura se tuvo en cuenta el proceso evolutivo de construcción con tres secciones resistentes (celosía; celosía + losa; sección completa) y las diferentes edades de ambos hormigones que forman parte de la sección resistente final.

Todos los nudos se estudiaron con programas de elementos finitos.

Uno de los problemas estéticos de esta estructura era la continuidad con los tramos adyacentes, de mucho menor canto. Con el fin hacer el cambio de canto menos abrupto se optó por apoyar el cordón superior metálico, en vez

del cordón inferior, disponiendo la pila con doble capitel a doble altura. Realmente la pila está formada por dos fustes independientes separados 50 mm puesto que la pila es monolítica con la estructura tipo de monorraíl.



Figura 8. Pila con dintel a doble altura

Las pilas eran de unos 22 m de altura para permitir el futuro cruce de la alta velocidad. La dimensión transversal de las mismas se limitó a 2.50 m de modo que fueran iguales a las pilas adyacentes de la estructura tipo de monorraíl. En dirección longitudinal se adoptó un canto de 2.50 m, determinado por cuestiones geométricas para la disposición de los aparatos de apoyo. Estas dimensiones, junto con la altura, eran insuficientes para resistir los esfuerzos de frenado en una única pila. Por ello, se vio que la opción más ventajosa era disponer apoyos fijos en ambas pilas de modo que el frenado se transmitía a ambas. La flexibilidad de las pilas era suficiente para no imponer esfuerzos grandes al tablero. En el caso de la estructura que cruza sobre la autovía, la altura de las pilas es mucho menor pues sólo está condicionada por el gálibo de la autovía. En este caso únicamente se dispuso un apoyo fijo, transmitiendo el frenado a una única pila.

La riostra de apoyos se diseñó como viga de alma llena rigidizada de 2.20 m de canto.

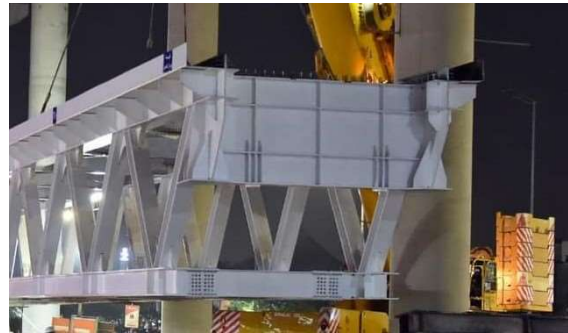


Figura 9. Riostra de apoyos

Como se ha mencionado, la construcción fue de la siguiente manera:

- Ejecución de la estructura en taller
- Transporte a obra y ensamblaje mediante uniones atornilladas.
- Izado de la estructura metálica completa.
- Colocación de prelosas.
- Hormigonado de la losa in situ.
- Fabricación, transporte e izado de vigas de rodaje.
- Conexión monolítica de las vigas de rodaje a la losa.

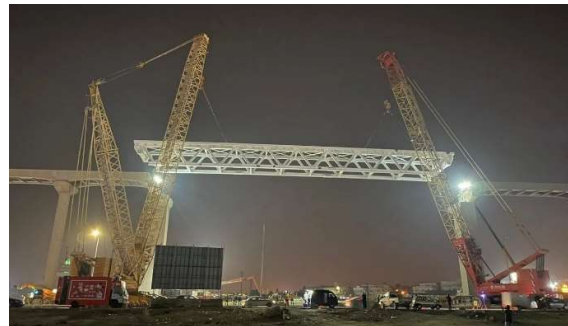


Figura 10. Montaje de celosía metálica

4. Arco de tablero inferior

En la línea NCC se han construido dos arcos de tablero inferior de 124 m de luz. La necesidad de realizar estas estructuras es similar en ambos casos: la línea de monorraíl cruza sendos pasos inferiores existentes de gran ancho y con un fuerte esviaje. El primero de ellos (Ben Zayed East North Tunnel) es de 53.20 m de ancho mientras que el segundo (Ben Zayed West North Tunnel) es de 65.35 m de ancho. Ambos túneles

están formados por 4 vanos con tres alineaciones de apoyo de modo que albergan dos calzadas vehiculares y dos zonas de paso de peatones.

En un primer momento se planteó la posibilidad de apoyar la estructura del monorraíl en la mediana del paso inferior, lo que hubiera requerido el correspondiente refuerzo de la estructura existente. Se desarrolló un estudio conceptual con el fin de analizar la viabilidad de la propuesta. Sin embargo, esta opción fue descartada tanto por la constructora como por la Administración pues la propiedad de estos túneles no es de NAT y el apoyarse en ellos hubiera requerido numerosos permisos que habrían dilatado los plazos de ejecución.

Por tanto, se decidió realizar el cruce con una estructura de gran luz. Estos túneles tan anchos, junto con el fuerte esvaje, implicaron la necesidad de estructuras de 124 m de luz.

El trazado del monorraíl en ambos casos no es recto. En el primer cruce, el monorraíl discurre en curva de 3150 m de radio. En el segundo caso el cruce se produce en una transición de radio mediante clotoide. Tanto por facilidad constructiva como por comportamiento estructural los arcos se encuentran en planos verticales y la estructura es recta, con el trazado inscrito entre los arcos.

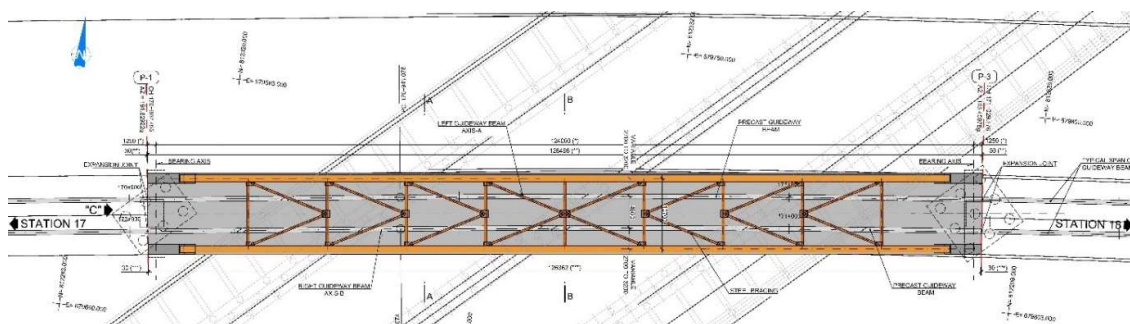


Figura 11. Planta de arco

La constructora requirió que la estructura metálica debía ser la menor posible por los altos costes del acero. Se estudió la posibilidad de construir el tablero de hormigón apeado sobre la estructura inferior. Como esta presenta cuatro vanos con tres alineaciones de apoyos, se vio que sí era posible disponer torres de apeo a lo largo de estas alineaciones de modo que la distancia entre las mismas era razonable tanto para disponer una cimbra porticada como para el comportamiento del tablero como viga continua posteriormente a la retirada de la cimbra y previamente al tesado de péndolas. Aunque esta fue la solución estudiada y definida en proyecto, finalmente, la constructora decidió usar una cimbra cuajada, cimbrando también la propia losa superior del marco existente, aunque dejando un estrecho paso puesto que estos túneles aún no se encontraban operativos.

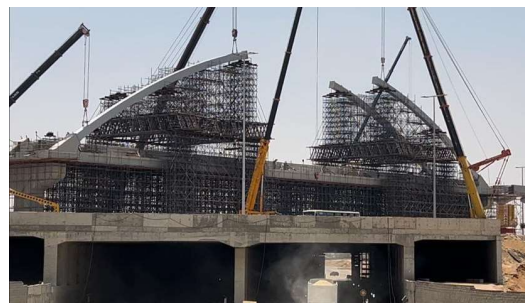


Figura 12. Cimbra de tablero y arcos

Por tanto, el tablero está formado por dos vigas longitudinales postesadas de 1.50 m de canto y 1.00 m de ancho que sirven de cordón de tracción del arco. Transversalmente se disponen vigas de hormigón armado cada 6.0 m de 1.05 m de canto. La losa, de 12.20 m de ancho, es de hormigón de 0.22 m de espesor mínimo en el eje y 0.34 m de espesor máximo en los bordes pues cuenta con drenaje al centro.

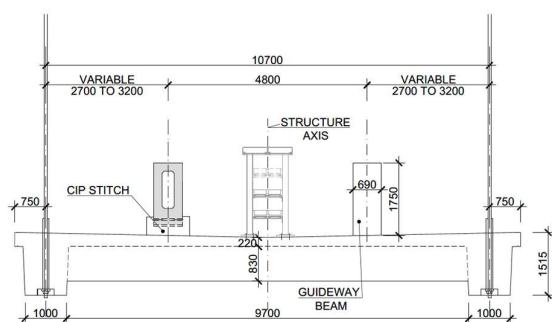


Figura 13. Sección transversal por péndola

La estructura metálica se fabricó enteramente en Egipto. Tanto desde el taller metálico como desde la constructora se pidió adoptar formas simples con detalles fáciles de ejecutar. Los arcos son rectangulares de sección constante, de 1.20 de canto por 1.00 m de ancho y se encuentran en planos verticales separados 10.70 m. Las almas son siempre de chapa #20 con un rigidizador longitudinal en forma de medio IPE-400. Las chapas superior e inferior son de #30 excepto en zona de arranques que se disponen chapas de #38. En todos los casos estas chapas se encuentran sin rigidizadores longitudinales. El arco presenta rigidizadores transversales cada 3.0 m.



Figura 14. Vista general de la estructura

Las péndolas se sitúan cada 6.0 m, coincidiendo con las vigas transversales del tablero y con un plano rigidizado del arco. La unión de la péndola al arco se hace mediante un diafragma de alma llena.

Ambos arcos se encuentran arriostrados para evitar la inestabilidad mediante arriostramientos en K dispuestos cada 12.0 m. Estos arriostramientos están formados por

tubos Ø559x20 para los elementos ortogonales a los arcos y tubos Ø406x7 y Ø406x10 para los elementos inclinados.



Figura 15. Arriostramientos (péndolas aún sin colocar)

Todos los nudos se estudiaron con programas de elementos finitos.

Las uniones en taller se hicieron soldadas mientras que las uniones en obra fueron atornilladas por petición de la constructora. Cada arco se transportó en tres piezas.



Figura 16. Unión de arcos con chapa a testa

Por tanto, se dispusieron dos uniones atornilladas a testa en cada arco formadas por 32 tornillos M36 de calidad 10.9. Todos los arriostramientos fueron atornillados a los correspondientes nudos también mediante chapas de testa.

La unión del arco a los arranques de hormigón se hizo mediante 20 barras postesadas de 26.5 mm de diámetro tesadas a 150 kN cada barra. Puesto que el arco se fabricaba en tres piezas, pero estas se conectaban mediante uniones atornilladas a testa, no existía holgura para corregir defectos de montaje. Para ganar esta holgura, los arranques de hormigón se

dejaron 75 mm más cortos respecto a su posición teórica de modo que una vez colocado el arco en su posición final se inyectaba el espacio sobrante mediante un grout. A petición de la administración se incluyó una llave de cortante embebida en el arranque de hormigón formada por dos IPE-200, si bien el rozamiento provocado por las barras postesadas era suficiente para transmitir los cortantes en el arranque.



Figura 17. Conexión arco-hormigón

En este caso también se decidió conectar monolíticamente las vigas de rodaje a la losa de tablero. En el caso de puente tipo viga o las celosías anteriormente descritas las ventajas son evidentes pues las vigas de rodadura incrementan el canto del elemento resistente aumentando la capacidad en rotura y mejorando el comportamiento en servicio, siempre que se controle la fisuración de la viga de rodaje. Sin embargo, en el caso de una estructura tipo arco no es tan evidente la ventaja de dicha conexión. La decisión estuvo principalmente motivada para eliminar los aparatos de apoyo y juntas que hubieran sido necesarios en caso de no conectar las vigas a la losa.

En un primer momento la idea era de realizar un arco tipo network por sus sabidas ventajas reduciendo los momentos flectores en el tablero y arcos ante acciones de ferrocarril asimétricas. Sin embargo, la presencia de las vigas de rodaje rigidiza longitudinalmente el tablero haciendo mucho menos efectiva la configuración network en comparación con las péndolas verticales.

Se estudió el comportamiento de un arco network y un arco clásico con un tablero rígido que incluyera las vigas de rodaje y se obtuvo que los esfuerzos sobre el tablero y arcos era muy similar en ambos casos, incluso con momentos

mayores en las vigas de rodaje en el caso del arco network.

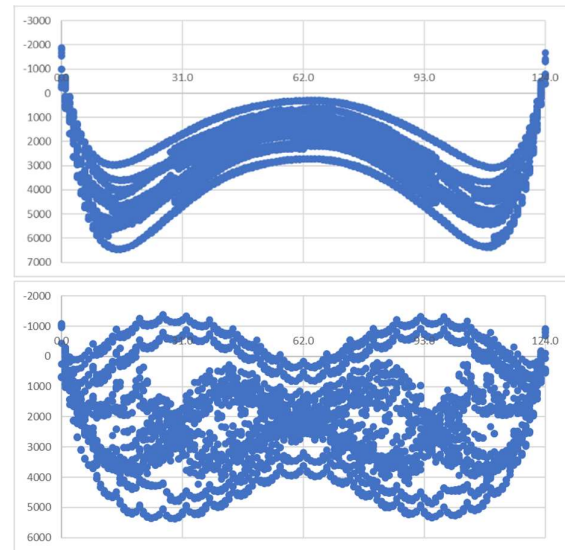


Figura 18. Envolvente de momentos flectores en vigas de rodaje. Arriba: configuración tipo network. Abajo: configuración péndolas verticales

Puesto que la configuración network no reducía los esfuerzos y causaba mayor consumo de acero, se descartó esta opción y se adoptó el arco clásico con péndolas verticales. Lógicamente, este nivel de momentos flectores junto con los axiles de tracción que la sobrecarga induce en todo el tablero, hicieron necesario disponer un pretensado longitudinal tanto en la losa como en las vigas de rodaje de extremo a extremo, una vez que se había dotado de continuidad a las mismas. La siguiente imagen muestra las vigas de rodaje colocadas sobre el tablero antes de realizar la conexión.



Figura 19. Colocación de vigas de rodaje

En este caso la continuidad estética con los tramos adyacentes, de tipología muy

diferente, era mucho más sencilla pues en la conexión el canto del tablero era bastante similar al canto de las vigas de rodaje tipo. El mayor impacto se debía a que el ancho del capitel debía ser de 13.20 m de ancho para disponer los apoyos bajo los arcos. Se adoptó un capitel de formas similares a los capiteles de la línea, si bien de grandes dimensiones.

Como se ha mencionado, la construcción fue de la siguiente manera:



Figura 20. Colocación de arcos

- Ejecución del tablero sobre cimbra cuajada. Tesado de los cordones longitudinales.
- Ejecución del primer tramo de los arcos apoyados sobre cimbra.
- Colocación del tramo central de arco y atornillado a los tramos adyacentes.

- Izado de vigas de rodaje.
- Colocación de arriostramientos de arcos.
- Ajuste de la posición de los arcos y unión a los arranques de hormigón.
- Colocación y tesado de péndolas.
- Desapeo del tablero.
- Conexión monolítica de las vigas de rodaje a la losa.
- Tesado longitudinal de las vigas de rodaje.



Figura 21. Tesado vigas de rodaje.



Figura 22. Estructura acabada

5. Conexión monolítica de viga de rodaje

Según se ha explicado anteriormente, la conexión monolítica entre las vigas de rodaje y la estructura soporte presenta claras ventajas entre

las que cabe citar: eliminación de aparatos de apoyo y juntas por su coste y por requerir mantenimiento y sustitución, aumento de la capacidad resistente a rotura por incremento considerable de canto, especialmente en puentes tipo viga, mejora del comportamiento en servicio al reducirse notablemente las

deformaciones ante sobrecargas. Sin embargo, es necesario prestar atención a las posibles tracciones que pueden aparecer en las vigas de rodaje, principalmente en zonas de momentos negativos de puentes continuos. Puesto que se trata de la superficie de rodadura, no es deseable la aparición de fisuras. Los operadores de las líneas suelen tener sus propios criterios de diseño y en muchos de ellos no se permite la fisuración. Por tanto, es necesario que estas vigas sean postesadas, bien en parque de fabricación si las zonas de juntas entre vigas se sitúan fuera de zonas traccionadas o bien con un postesado a posteriori atravesando todas las vigas y juntas que compriman la totalidad de las vigas de rodaje.

Otro detalle por definir con sumo cuidado en la propia unión. La unión inferior (longitudinal) debe transmitir el rasante si realmente la viga de rodaje se comporta como cabeza de tracción o compresión de la sección completa. En Sener se han empleado dos sistemas distintos: en el monorraíl de El Cairo se han construido las vigas de rodaje prefabricadas con llaves de cortante en su cara inferior, de modo que se aumenta la fricción entre la propia viga y el hormigón in situ. Además, se dispone armadura de conexión entre ambos elementos mediante barras en U que se insertan en las vigas de rodaje en orificios dejado al efecto y posteriormente inyectados. En otras realizaciones, como el monorraíl de Panamá, la conexión se ha hecho mediante barras con acopladores transfiriendo todo el rasante por armadura. En todos los casos es necesario considerar que esta unión debe ser capaz de resistir el momento flector causado por las fuerzas horizontales actuantes sobre el tren, bien de fuerza centrífuga o bien de descarrilamiento.

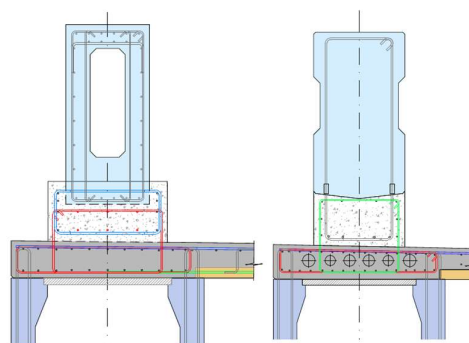


Figura 23. Tipos de conexión entre elementos

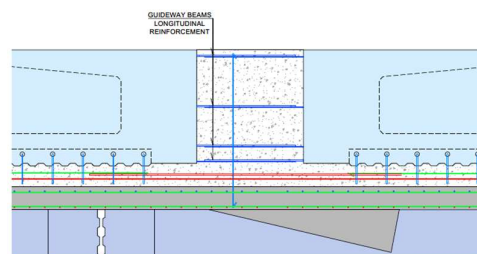


Figura 24. Conexión vertical entre vigas de rodaje

Agradecimientos

Este proyecto se desarrolló en Sener desde finales de 2019 a 2022, es decir, en plena pandemia por la COVID-19. Fueron momentos difíciles y por ello es preciso agradecer a las personas que participaron en Sener junto con los autores como Juliana Fernández, Elsa Nunes, Pedro Fonseca, Catarina Lamego y Laura Ramos. Igualmente es necesario agradecer la colaboración de los equipos de obra de Orascom y The Arab Contractors.

Referencias

- [1] Sirisonthi, A, Sanya, S., Joyklad, P. & Suparp, S. (2019) Development and application of a monorail system in Thailand, *Monorailx 2019 Conference Proceedings*
- [2] Manterola Armisen, J., Fernández Troyano, L., Astiz Suárez, M. Gil Ginés, M. & Martínez Cutillas, A. (1998) Puentes en celosía, *Revista de Obras Públicas*. 3373.
- [3] Llombart Jacques, J.A., Revoltós Fort, J. (2002) Puente sobre el río Jarama, en Titulcia

(Madrid), *II Congreso de ACHE puentes y estructuras*.

- [4] Millanes Mato, F., Ortega Cornejo, M. & Carnerero Ruiz, A. (2010) Proyecto y ejecución de dos arcos mixtos con elementos tubulares y sistema de péndolas tipo network: Puentes Arco de Deba y Palma del Río, *Hormigón y Acero*. 61 (257): 7–39.