

Diseño estructural de las estaciones de la red de monorraíl de El Cairo

Structural design of the Cairo monorail network stations

Carlos Llopis Camps^a, Tomás Antonio Vasquez^b, David González Martí^c, Ignacio Herrero Gomis^d, Carlos Maestro González^e

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Ingeniería y Sistemas. Jefe de Disciplina Estructuras civiles. carlos.llopis@mobility.sener

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Ingeniería y Sistemas. Ingeniero de estructuras. tomas.antonio@mobility.sener

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Ingeniería y Sistemas. Ingeniero de estructuras. david.gonzalez@mobility.sener

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Ingeniería y Sistemas. Ingeniero de estructuras. ignacio.herrero@mobility.sener

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Ingeniería y Sistemas. Ingeniero de estructuras. carlos.maestro@mobility.sener

RESUMEN

El monorraíl de El Cairo, actualmente en ejecución, es la red de monorraíl más larga sin conductor del mundo, con un total de 96 km. El proyecto consta de 2 líneas: New Capital City line que conectará la actual ciudad del Cairo con las nuevas áreas urbanas del este de la ciudad, New Cairo City, actualmente en desarrollo con una longitud de 54 km, 21 estaciones y unas instalaciones de cocheras y talleres de 290.000 m² y 6th October line que prestará servicio al oeste del Nilo hasta Guiza con 42 km de longitud, 13 estaciones y unas cocheras y talleres también de 290.000 m².

ABSTRACT

The Cairo Monorail, currently under implementation, is the longest driverless monorail network in the world, totaling 96 km. The project consists of 2 lines: New Capital City line which will connect Cairo with the new urban areas in the east of the city, New Cairo City, currently under development with 54 km long, 21 stations and 290,000 sqm and workshop facilities and the 6th October line which will serve the west of the Nile to Giza with 42 km in length, 13 stations and 290,000 sqm.

PALABRAS CLAVE: monorraíl, estación elevada, construcción estaciones.

KEYWORDS: monorail, elevated station, station construction

1. Introducción

El monorraíl de El Cairo, actualmente en ejecución, es la red de monorraíl más larga sin conductor del mundo, con un total de 96 km. El proyecto consta de 2 líneas:

- New Capital City line: conectará El Cairo - New Cairo City. Tiene una longitud de 54 km

con 21 estaciones y las instalaciones de cocheras y talleres de 290.000 m²

- 6th October line: Desde oeste del Nilo hasta Guiza con 42 km de longitud, 13 estaciones y las cocheras y talleres de otros 290.000 m².

Está previsto que el servicio se preste por una flota de 70 trenes sin conductor de 4 vagones, proporcionando una capacidad de 45.000 pasajeros por hora y sentido, con una velocidad máxima de 90 km/h.



Figura 1. Vista de la futura estación Al Masa

2. Estrategia general. Tipologías

Hay que señalar que en una obra de esta envergadura hay que consensuar las necesidades urbanísticas, funcionales y estéticas de la propiedad además de su capacidad económica, con las necesidades de la constructora (que es el cliente) que a su vez se dividen en dos grandes grupos, la constructibilidad (plazos y mantenimiento posterior) y la rentabilidad económica de la obra.

La estructura tiene unos elementos comunes que definen el comportamiento global y se ha tratado de optimizar con un compromiso entre la sencillez, rapidez de ejecución, economía de medios y economización de materiales. Esto nos ha llevado a realizar reuniones multidisciplinarias de forma constante para asegurar que los objetivos comunes eran alcanzados siguiendo unas pautas de cumplimiento mínimas pautadas.

Las 34 estaciones se agruparon bajo distintas consideraciones, aunque básicamente son las siguientes:

- Capacidad de pasajeros

- Número y disposición de accesos peatonales.
- Número y disposición de conexiones con otras vías o intercambiadores.
- Disposición dentro del conjunto de la red vial del monorraíl.
- Estaciones abiertas o cerradas.

Atendiendo a estos condicionantes principales se agruparon las 34 estaciones en 4 tipos de estaciones principales. De forma general se escogía la estación más representativa del conjunto de cada tipología y se desarrollaba hasta ejecución, pudiendo adaptar cada tipología a las estaciones concretas de forma relativamente sencilla. A modo de ejemplo, la estación 19 (Al Masa) fue la estación tipo desarrollada del “Tipo 4”, ya que fue la construida en primer lugar.

Estas cuatro tipologías generales se dividían a su vez en dos subtipos o grupos: con y sin “switch”. Este hecho diferenciador modifica el ancho de la estación ya que cambia la distancia entre las vigas del monorraíl y obliga a adaptar cada uno de los tipos bifurcándose en dos subtipos, aunque no todos los elementos de la estación se ven afectados por esta discriminación.

En cuanto a la cubierta, se hicieron dos diseños: estación abierta y estación cerrada. Este último condicionante también influye como es lógico en otros elementos de la estación, aunque no fue determinante para la inclusión de un nuevo “subtipo” sino simplemente de adaptación pormenorizada a cada ubicación.

3. Descripción general estructura

Las líneas discurren en su totalidad en viaducto, por lo que todas las estaciones son elevadas, siendo el viaducto estándar de 30 m de

luz formado únicamente por dos vigas carril y existiendo soluciones específicas para el cruce de obstáculos de mayores luces.

Las estaciones elevadas tienen 100 m de largo y 25 m de ancho con dos niveles: vestíbulo y andén. La estación se apoya en 6 columnas centrales de hormigón distanciadas 20 m aproximadamente. La estación cuenta con una cubierta metálica y dos únicos accesos mediante una pasarela peatonal:

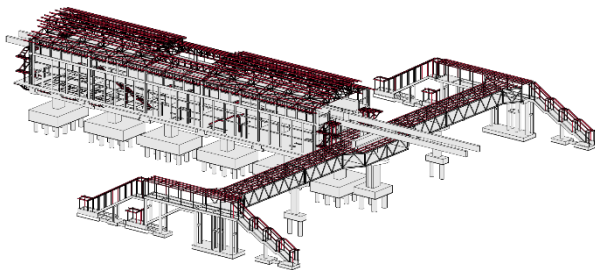


Figura 2. Modelo 3D de la estación tipo

Las columnas soportan un doble voladizo transversal postesado donde apoyan todas las vigas longitudinales de la estación. Tanto el nivel vestíbulo como el andén están formados por vigas de hormigón pretensado sobre las que se apoya la losa de compresión formada por prelosas prefabricadas:

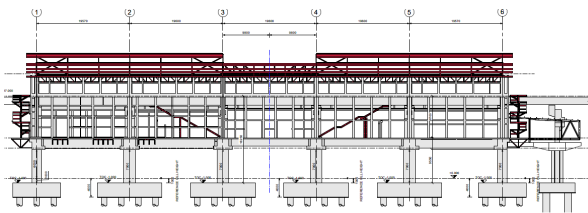


Figura 3. Sección longitudinal tipo

Desde el punto de vista del diseño, la acción sísmica gobierna tanto el conjunto como gran parte de los elementos que lo forman. El efecto pórtico es casi inexistente en sentido transversal, mientras que en sentido longitudinal sí que se consigue, soportando las pilas extremas unos esfuerzos superiores a las centrales por este motivo, aunque su ancho tributario en cuanto a cargas sea menor.

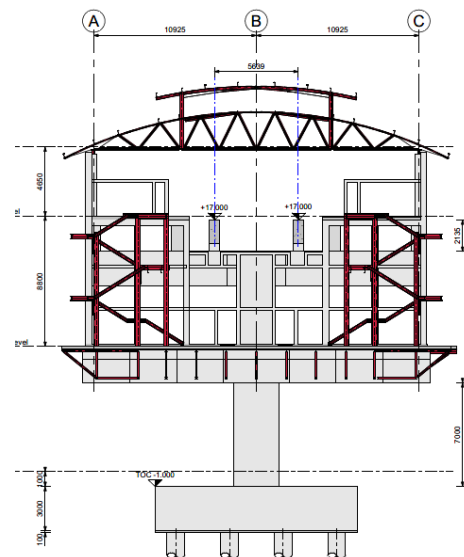


Figura 4. Sección transversal tipo

4. Descripción estructura principal

4.1 Cimentación

Cada pila tiene un encepado con 12 pilotes de 1,20 m de diámetro. Todas las pilas tienen cimentaciones idénticas, lo que simplifica el proceso de diseño y construcción. Los encepados tienen unas dimensiones tipo de 10.00x13.60x3.00 m.

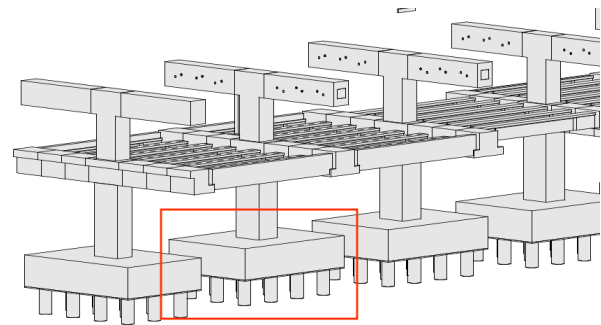


Figura 5. Vista 3D del encepado tipo

4.2 Pilas

Las pilas de las estaciones se dividieron en dos grupos a nivel de diseño:

- Pilas Exteriores (ejes 1 y 6). Sección Rectangular de 3.00x2.00 m.
- Pilas Interiores (ejes 2 a 5). Sección:

- Desde el nivel del suelo hasta el nivel del vestíbulo: 3.00x2.50 m.
- Desde el nivel del vestíbulo hasta el nivel de la plataforma: 2.50x2.00 m

En las imágenes siguientes podemos ver la geometría y armado de una de las pilas tipo, tanto en alzado como en sección transversal.

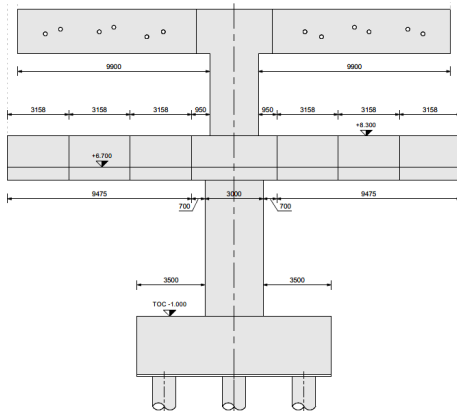


Figura 6. Sección transversal pila

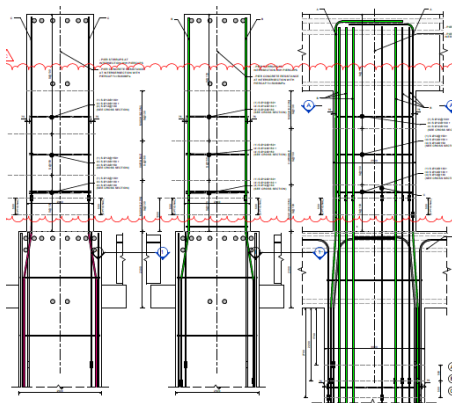


Figura 7. Alzado del armado y cruces

En las imágenes siguientes podemos ver la geometría y armado de una de las pilas tipo, tanto en alzado como en sección transversal.

La disposición constructiva del armado principal de las pilas no es trivial, ya que se tuvo que compatibilizar la disposición de tres capas de armado, los solapes y los encuentros con la armadura de los capiteles y los ductos, además de la reducción en la sección de la propia pila al pasar de nivel, lo que dificultó de forma importante los espacios mínimos para facilitar el hormigonado y la buena ejecución del curado.

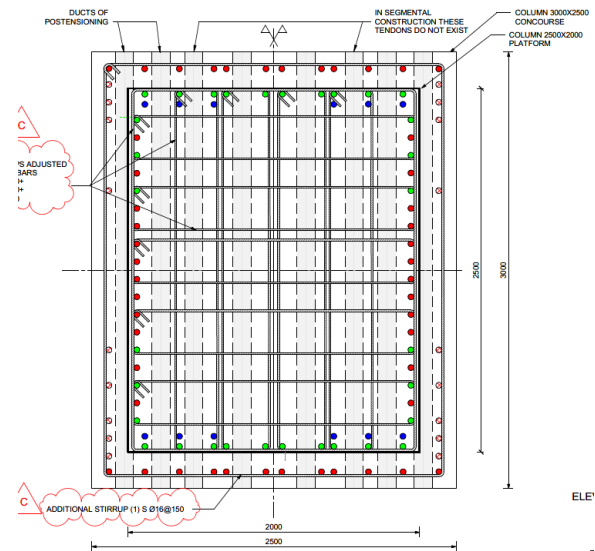


Figura 8. Sección transversal armado

4.3 Capiteles

La construcción de los capiteles se planteó dividiendo cada lado del cabezal de la pila en 3 piezas de elementos prefabricados. Los elementos prefabricados se ensamblaban a cada lado de la columna y luego se postesaban individualmente, utilizando técnicas similares a las de la construcción de puentes por dovelas.

Finalmente la ejecución se realizó “in situ” mediante encofrado y cimbra tradicional.

Los capiteles del nivel “Concourse” (primer nivel o inferior) soportan el piso del nivel del vestíbulo y las pasarelas de evacuación perimetrales.

Los capiteles del nivel “Platform” (segundo nivel o superior) soportan las dos vigas guía del monorraíl, las dos plataformas de andén y la cubierta metálica.

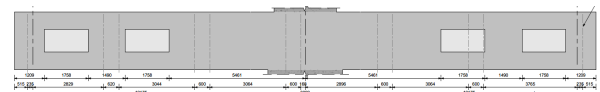


Figura 9. Alzado del capitel

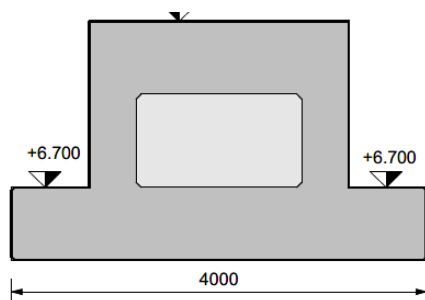


Figura 10. Sección transversal del capitel

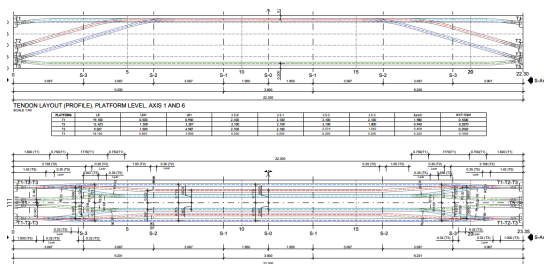


Figura 11. Alzado y planta del postesado

Los capiteles del nivel inferior (concourse) están gobernados por la fase de servicio, pero sobre todo por las fases constructivas, ya que gran parte de la estructura del nivel superior ha de apoyarse en el nivel concourse hasta que el nivel superior (platform) se haya ejecutado y el tesado haya concluido.

Hay que señalar que el tesado del nivel inferior viene determinado por las fases constructivas debido a la importante magnitud de las cargas que gravitan sobre ella en situación provisional, mientras que el nivel superior viene condicionado de forma más importante por las acciones en fase de servicio.

4.4 Vigas longitudinales.

Las vigas longitudinales son prefabricadas y se han agrupado en los tipos A, B y C según su disposición y carga. A su vez tienen varios subtipos según sean interiores o tengan algún requisito adicional geométrico o de cargas:

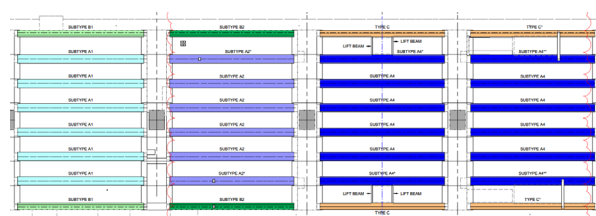


Figura 12. Disposición de vigas longitudinales

La sección transversal en “T” de las vigas del nivel “Concourse” es de 1,45 de canto, con un ancho que varía entre 0,60 y 0,90 m:

Debido a la voluntad de minimizar el mantenimiento estructural, los apoyos elastoméricos habituales de estos elementos no podían disponerse, siendo el comportamiento longitudinal como viga continua empotrando la viga prefabricada en los apoyos. La continuidad de momentos en cara superior tenía una complejidad importante por la congestión de armaduras al coincidir con las vainas de postesado.

La cuantía de armado longitudinal de las vigas venía determinada por la acción sísmica y el efecto pórtico en sentido longitudinal, mientras que el armado de positivos venía determinado por la fase de se servicio. De especial relevancia fue el encaje de las vigas especiales del último vano.

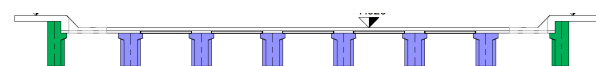


Figura 13. Sección transversal de las vigas

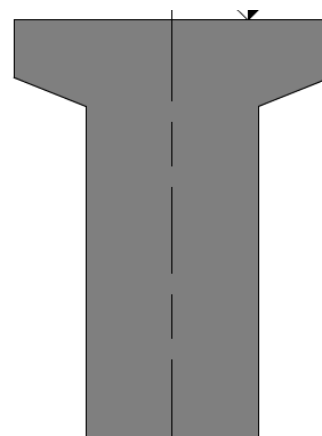


Figura 14. Sección transversal tipo A1

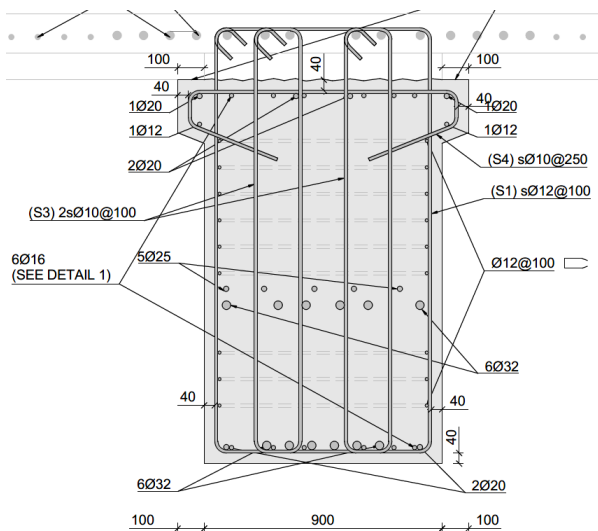


Figura 15. Sección transversal tipo

La losa del nivel concourse se diseñó sin juntas, siendo necesario incorporar los efectos reológicos al cálculo de esfuerzos.

Las vigas del nivel Platform en “doble T” tienen un canto de 2,80 m con un ancho de 1,30 m, tal y como se aprecia en la siguiente imagen:

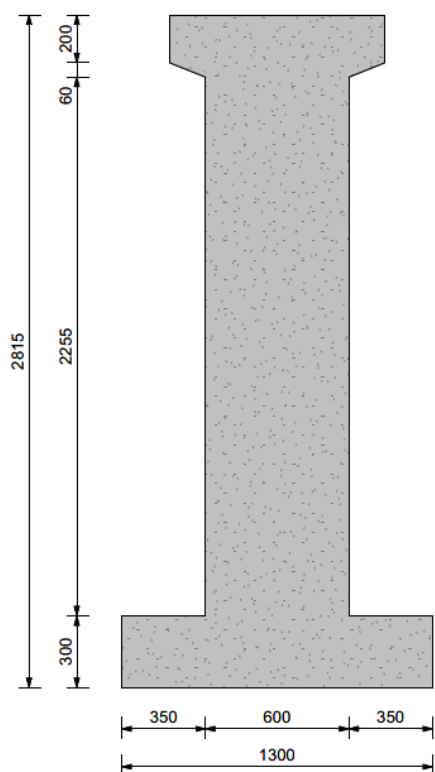


Figura 16. Sección transversal. Geometría

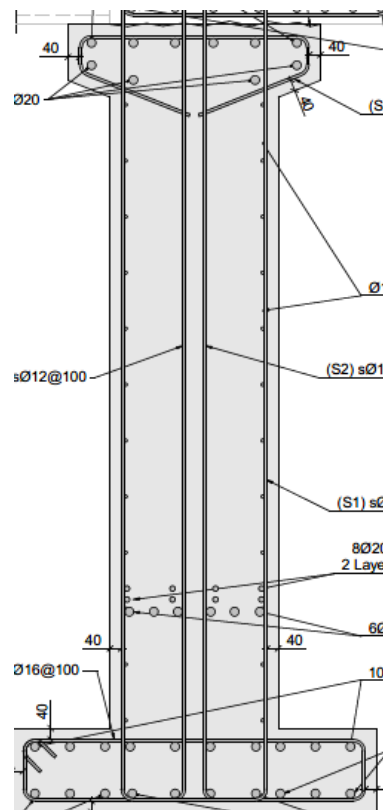


Figura 17. Sección transversal. Armado

Las vigas de gran canto del nivel platform se diseñaron teniendo en cuenta las fases constructivas, teniendo una sección distinta en cada fase constructiva.

4.5 Cubierta

Se trata de una celosía tridimensional, tal y como se puede apreciar en las siguientes imágenes:

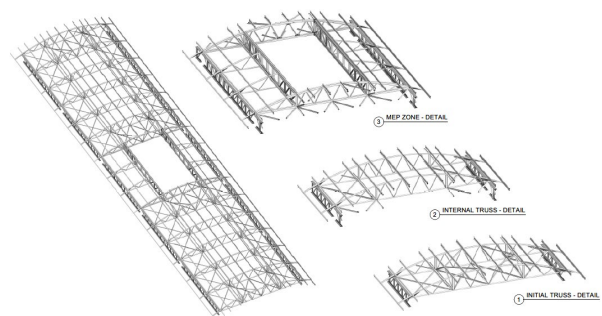


Figura 18. Cubierta. 3D

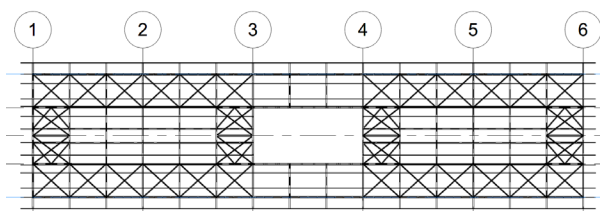


Figura 19. Cubierta. Planta

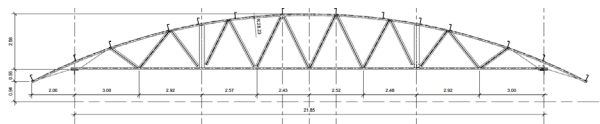


Figura 20. Cubierta. Sección

La cubierta se diseñó teniendo en cuenta el efecto pórtico con el objetivo de aligerar la misma al disminuir la necesidad de disposición de arriostramientos transversales..

3. Conclusión

Se ha tratado en el artículo de exponer de forma sencilla como se abordó el proceso de diseño de las 34 estaciones del monorraíl de El Cairo, teniendo en cuenta las necesidades de la propiedad y su compromiso con las necesidades de la constructora (el cliente) que a su vez se dividen en dos grandes grupos, la constructibilidad (plazos y mantenimiento posterior) y la rentabilidad económica de la obra.