

## Proyecto estructural de las estaciones de la Red Line South del Metro de Doha, Catar.

### *Structural design of Metro stations of Doha Red Line South, Qatar*

#### **Pietro BARTALOTTA**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
MC2 Estudio de Ingeniería  
Ingeniero  
[pietro.bartalotta@mc2.es](mailto:pietro.bartalotta@mc2.es)

#### **Borja ENCINAS MALDONADO**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
MC2 Estudio de Ingeniería  
Ingeniero  
[borja.encinas@mc2.es](mailto:borja.encinas@mc2.es)

#### **Álvaro SERRANO CORRAL**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
MC2 Estudio de Ingeniería  
Director Técnico  
[alvaro.serrano@mc2.es](mailto:alvaro.serrano@mc2.es)

#### **Alejandro YUSTRES REAL**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
MC2 Estudio de Ingeniería  
Ingeniero  
[alejandroyustres@mc2.es](mailto:alejandroyustres@mc2.es)

#### **Juan Carlos ALONSO LÓPEZ**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
MC2 Estudio de Ingeniería  
Ingeniero  
[juancarlos.alonso@mc2.es](mailto:juancarlos.alonso@mc2.es)

### **RESUMEN**

Dentro de la construcción de varias líneas de Metro en la ciudad de Doha (Catar), MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo Tyspa) participa en el proyecto de 3 estaciones del tramo Sur de la línea Roja, que atraviesa la ciudad de Norte a Sur. La geometría de cada una de las estaciones está muy condicionada por el diseño arquitectónico de las mismas, así como a la altura que la vía del metro llega a la estación, siendo en todos los casos sobrerasante. Este hecho, además de las grandes luces y la agresividad ambiental del entorno hacen muy complejo el desarrollo de este proyecto.

### **ABSTRACT**

Within the construction of several Metro lines in the city of Doha (Qatar), MC2 Estudio de Ingeniería (Tyspa Group) participates in the project of 3 stations in the southern stretch of Red Line that crosses the city from North to South. The geometry of each station is highly conditioned by the architectural design, as well as the height that the subway track reaches the station, being in all cases elevated. This fact, in addition to the great spans and the environmental aggressiveness, makes the development of this project more complex.

**PALABRAS CLAVE:** hormigón, pretensado, prefabricado, durabilidad, robustez, bielas y tirantes

**KEYWORDS:** concrete, post-tensioning, precast, durability, robustness, strut and ties

## 1. Introducción

A consecuencia de la elección de Catar como organizador del Mundial de Fútbol en el año 2022, este país ha decidido dar un impulso a su sistema de transportes. La realización de tres estaciones de metro (*Economic Zone, Ras Bu Fontas, Al Wakra*) forma parte del proyecto de construcción del tramo Sur de la nueva línea Roja del metro de Doha. Dicha línea tiene una longitud total de 40 Km y forma parte de una primera fase que tiene como fin el estar operativa para el año 2020.

Las tres estaciones, que forman parte del último tramo Sur de la Línea Roja, fueron adjudicadas al consorcio FYAP (FCC-Yuksel-Archirodon-Petroserv) que posteriormente encargó el diseño de este tramo a la UTE Sener-Typsa, siendo MC2 Estudio de Ingeniería responsable del diseño estructural de los edificios y cubiertas de las estaciones de este tramo.

El proyecto de las tres estaciones se dividió en dos fases, una primera que se refería en sí a la estructura de la estación, y una segunda, que desarrollaba el diseño de cubiertas y estructuras metálicas. La presente comunicación tratará de hacer una introducción a la tipología de los diferentes edificios, así como los elementos más destacados de la primera fase.

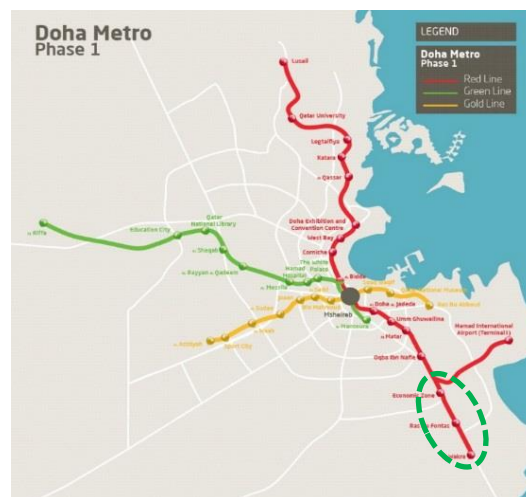


Figura 1. Plano general de la primera fase del Metro de Doha [1].

## 2. Planteamiento de la estructura

### 2.1. Concepto arquitectónico

El proyecto arquitectónico condicionó en gran parte la solución estructural de todos los elementos de las estaciones. El promotor, Qatar Rail, intentando que el desarrollo de esta red de metro se hiciera con una marca reconocible, encargó a UN Studios la elaboración de un *Architectural Branding Manual (ABM)*, en el que se recogía el diseño arquitectónico de las diferentes tipologías de estaciones. Dicho diseño, posteriormente se debería adaptar por el equipo de diseño a la geometría de cada estación, respetando en la mayor medida posible lo definido en dicho ABM, siendo en algunos casos, muy determinantes a la hora de elegir soluciones estructurales. En las siguientes imágenes se pueden ver dos *renders* del estado final de las estaciones de Al Wakra y de Ras bu Fontas.



**Figura 2. Render del Branding elaborado por UN Studio [2]**

## **2.2. Condicionantes climatológicos**

El clima de Catar es uno de los más áridos del mundo. La temperatura media de las mínimas mensuales está en torno a los 12°, mientras que la media de las máximas está en torno a 49°C. A este hecho se une la baja precipitación, cuya media anual está en torno a 75 mm.

La topografía de la zona es poco abrupta, y en algunos casos, el terreno próximo a la costa puede hallarse por debajo del nivel del mar. Este hecho junto a la elevada temperatura puede provocar que exista una alta concentración de cloruros. La posible filtración de agua con alta concentración salina debido a la proximidad del mar, provoca estas elevadas concentraciones tanto en el terreno como en el aire.

## **2.3. Durabilidad**

Unos de los requerimientos por parte del cliente era que la vida útil de la estructura debía ser de 120 años, lo cual además de ser un periodo más largo de lo habitual, es especialmente difícil en el clima de Catar. Este hecho afectó fundamentalmente a varios aspectos:

- **Recubrimientos:** Se elaboró un análisis de difusión de cloruros para un periodo de 120 años con el fin de evaluar la estructura en su vida útil. Para evitar que los cloruros alcanzaran la armadura, en el caso de hormigones en contacto directo con el terreno y en la zona en que estos cloruros pueden subir por capilaridad, se variaron las mezclas de hormigones para hacerlas mucho más impermeables además de incrementar los recubrimientos, y así se pudiera garantizar la durabilidad de la estructura.
- **Fisuración:** En los elementos en contacto con el terreno, así como en ambientes exteriores se limita la apertura de fisura a 0.15 mm. que implica una reducción del 25% del límite definido en el Eurocódigo.
- **Mayoración de las sobrecargas:** Se elaboró un estudio de fiabilidad que concluyó que únicamente habría que incrementar la mayoración de las sobrecargas de 1.50 a 1.60. La mayoración del resto de cargas, así como la reducción de materiales, serían los habituales.

## 2.4. Robustez

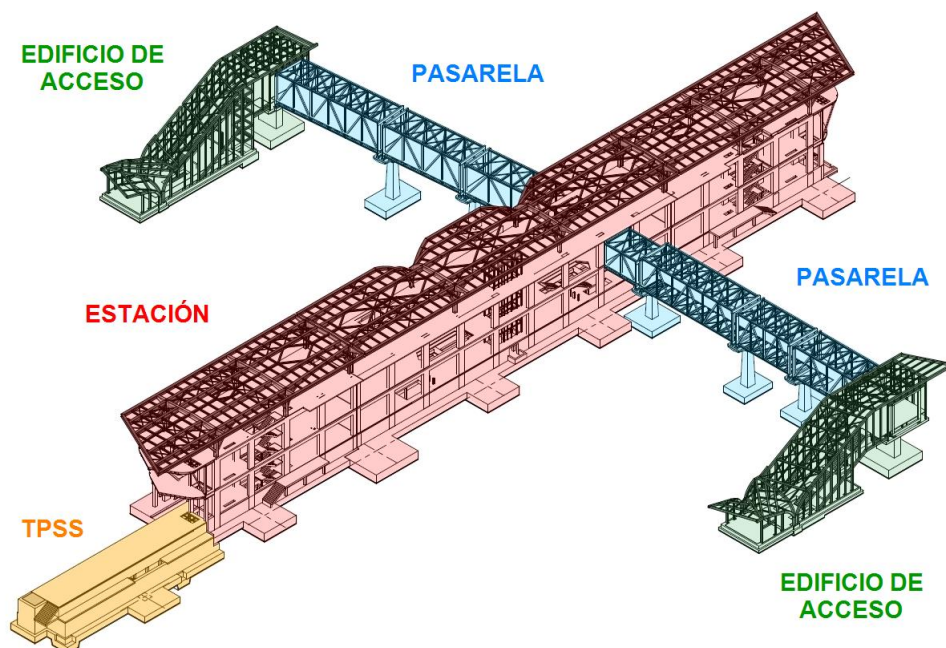
El cliente requería un proyecto que tuviera en cuenta unas características adecuadas de robustez de los elementos estructurales. Para materializar esta petición, se dispusieron en el caso de los forjados, tirantes que fueran capaces de soportar la carga vertical formando una catenaria. [3]

## 3. Configuración estructural de los edificios

En todos los casos, la distribución de la estación es lineal a lo largo de la vía ferroviaria. En el *Architectural Branding Manual* se determinaron que las luces entre soportes en dirección longitudinal eran de 10 m. en el caso de Ras Bu Fontas y 20 m. en el caso de Economic Zone y Al Wakra. Están amplias luces condicionaron en gran medida la configuración de la estructura.

### 3.1. Estación de Ras bu Fontas

La estación de Ras bu Fontas, es un edificio de 220 metros de longitud, 15 metros de ancho y una altura total de 25 metros. A su vez se divide en una zona de TPSS<sup>[a1]</sup> (*Traction Power Sub-Station*), de 46 metros de longitud y que lo forma un sótano de doble altura; y el resto del edificio, que además de este sótano consta de 3 plantas sobre rasante.

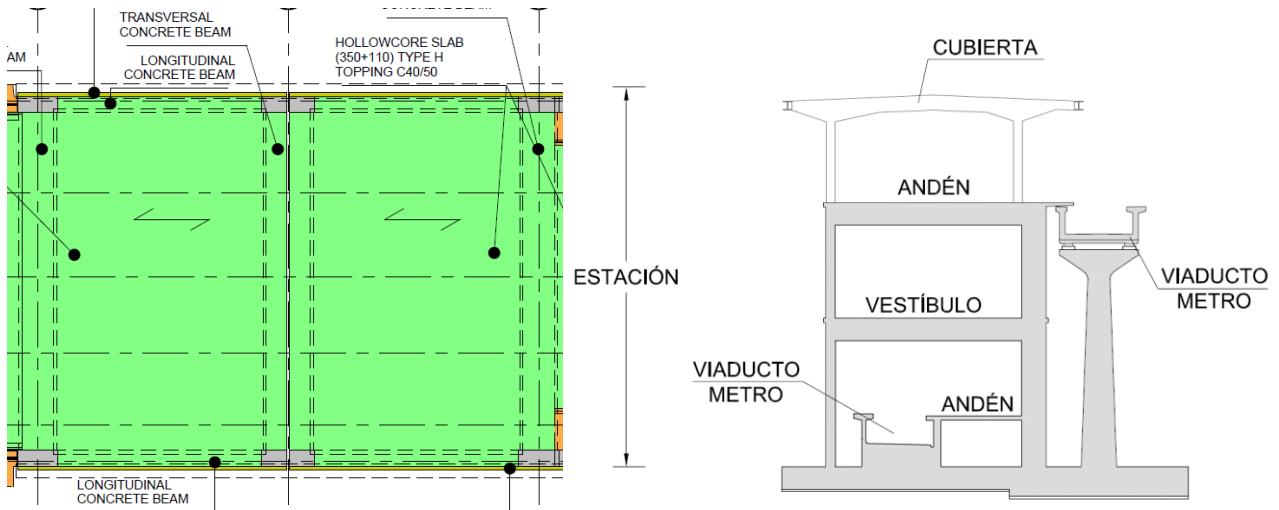


**Figura 3. 3D de la estructura de la estación de Ras bu Fontas**

La estructura general del edificio se compone de una composición de pórticos de hormigón, con luces transversales de hasta 14 metros (Figura 4) y longitudinales de 10 metros.

Dado que la distancia entre pórticos es menor en dirección longitudinal, se planteó el apoyo directo mediante placas alveolares entre pórticos longitudinales (Figura 4). En las zonas en que el tamaño de los huecos no permitía el uso de las placas, se empleó una solución de forjado mixto apoyado en vigas metálicas.

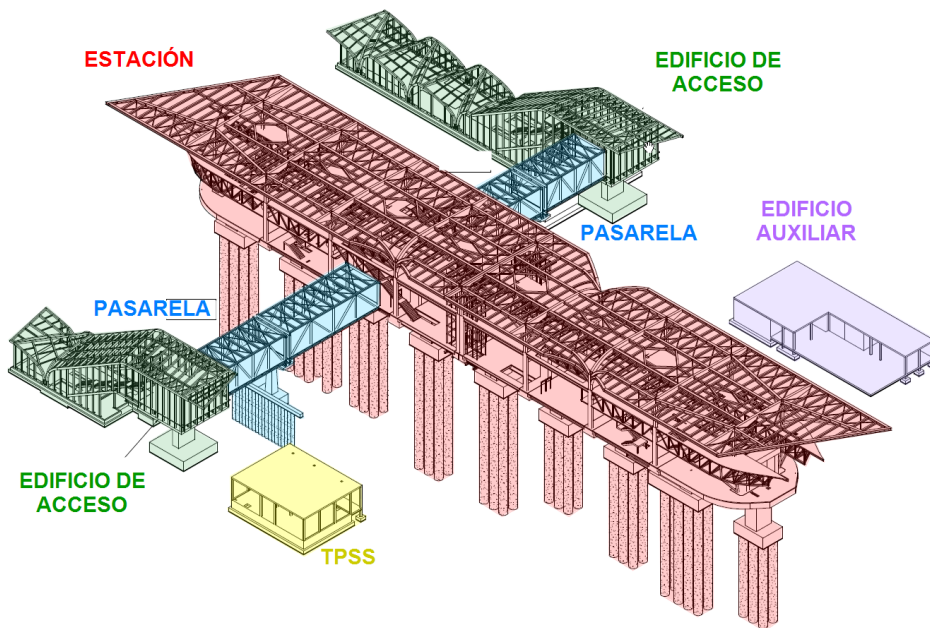
En este caso, la vía del metro llega a la estación por la planta baja (+6.200) y al nivel denominado *Platform 2* (+23.900). En el primer caso, la vía apoya en la losa de cimentación, mientras que la vía elevada va apoyada en pilas exentas de la estación, pero con cimentación compartida para evitar asentamientos diferenciales.



**Figura 4. Forjado y pórtico tipo de Ras bu Fontas**

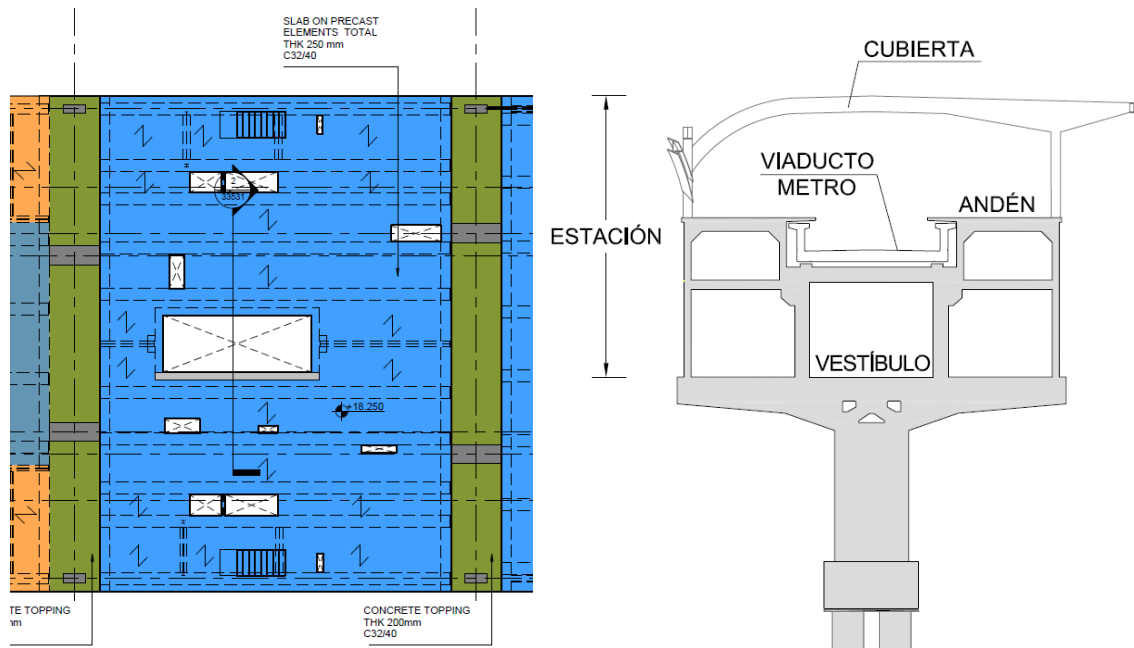
**3.2. Estación de Al Wakra**

La estación de Al Wakra tiene una longitud total de 180 metros y un ancho de 25 metros. Su primera planta se eleva unos 10 metros sobre el terreno, teniendo una altura de 17 metros, en los que se albergan 3 niveles sobre rasante. En la siguiente figura se pueden ver los diferentes edificios de la estación.



**Figura 5. 3D de la estructura de la estación de Al Wakra**

Como se ha mencionado en el apartado 3, Al Wakra únicamente puede apoyarse en su banda central dado que se construirán unos túneles a cada lado de la estación, por lo que toda ella, se apoya en unas pilas martillo, separadas cada 20 metros. Estas pilas están formadas por una pila rectangular hueca de 4.6 m de longitud por 3.5 de ancho. Su dintel postesado sirve de apoyo tanto de los pórticos de la estación, como de unas grandes vigas pretensadas de 20 m de luz que junto a un forjado de prelasas de hormigón, conforman el forjado del vestíbulo. (Figura 6).

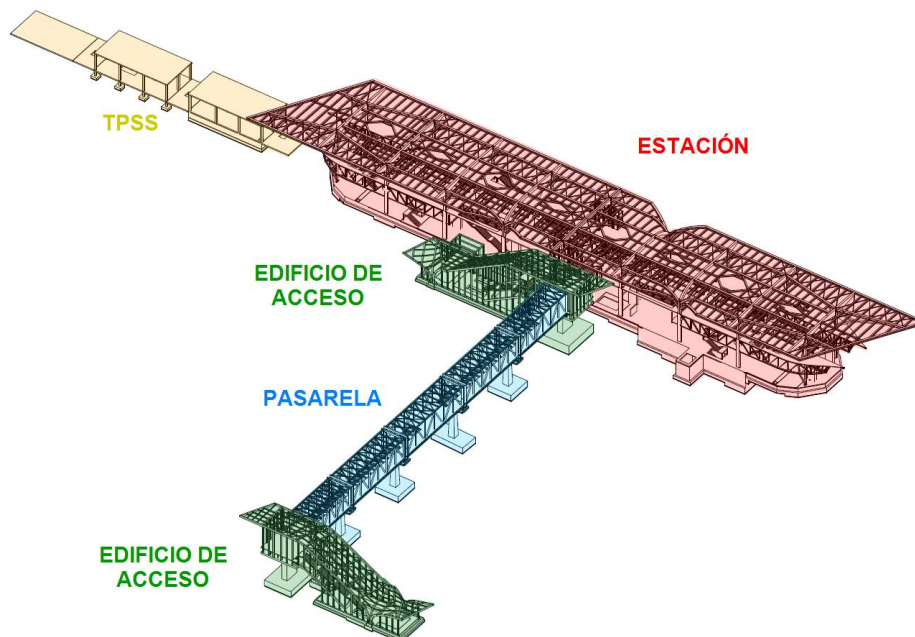


**Figura 6. Forjado y pórtico tipo de Al Wakra**

En esta estación, la vía llega a nivel *Platform* (+28.400) con una sección doble, dividiendo los edificios en 2 partes en sus niveles superiores. En ambos casos, los forjados de *Platform* y *Underplatform* van apoyados en dos pares de celosías cuyos cordones corresponden con estas plantas. La solución de forjados entre celosías es de placas alveolares y forjados mixtos.

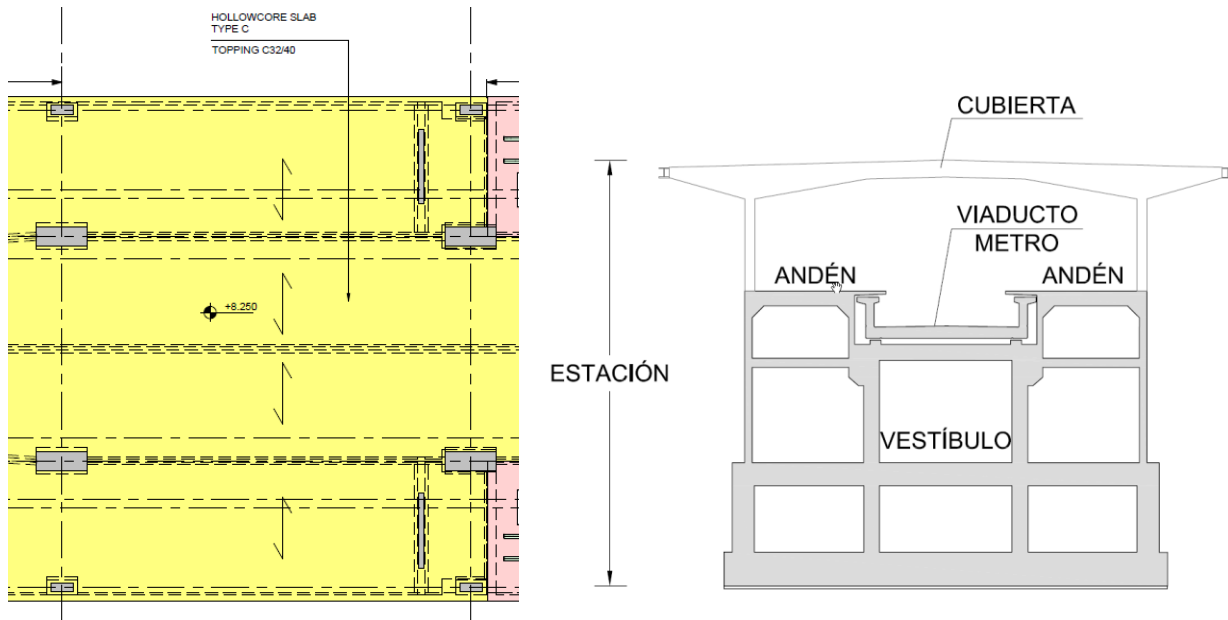
### 3.3. Estación de EZ (Economic Zone)

Las dimensiones de la estación de EZ prácticamente iguales de Al Wakra, pero con la salvedad de que se apoya en una losa de cimentación, además de que cuenta con un sótano adicional. En la siguiente figura se puede ver la distribución de edificios en la estación.



**Figura 7. 3D de la estructura de la estación de Economic Zone**

En cuanto a forjados, la principal diferencia entre ambas estaciones radica en el nivel del vestíbulo. En EZ, hay una parte de este forjado que sirve de techo del sótano, y otra, en la se encuentra muy próximo a la losa de cimentación, generando un pequeño espacio destinado a instalaciones. Ambas zonas son resueltas con losas alveolares, las que está sobre el sótano están apoyadas en vigas de hormigón, mientras en la zona del forjado elevado, se apoyan en muros que descansan directamente en la losa de cimentación. (Figura 8)



**Figura 8. Forjado y pórtico tipo de Al Wakra**

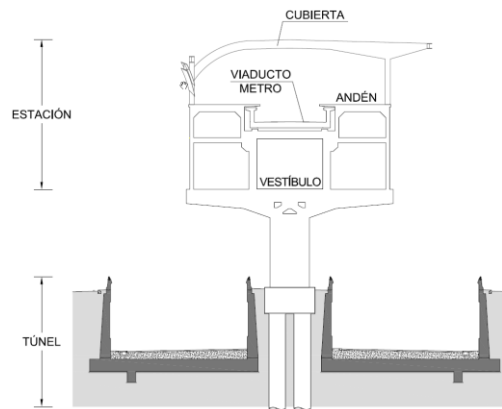
Los niveles superiores de Al Wakra y EZ son muy similares.

#### 4. Cimentaciones

La tipología de la cimentación depende más de la morfología del edificio que de los parámetros del terreno. En general, salvo la posibilidad de la existencia de cavidades kársticas puntuales, la resistencia del terreno es suficiente para el empleo de cimentaciones superficiales.

Las estaciones de Ras bu Fontas y Economic Zone (EZ) disponen de un sótano, y dado el elevado nivel freático de la zona por su proximidad al mar, lo cual genera subpresiones, hizo que la solución elegida fuera una losa de cimentación. En el caso de EZ, las luces entre pórticos son de 20 metros, siendo las reacciones de los pilares más concentradas. Debido a este hecho, parece que la solución más adecuada es la de losa de cimentación de espesor variable, con un canto en la zona bajo pórticos de 1.50 m, reduciéndose hasta los 0.75 m en las zonas intermedias. En el caso de Ras bu Fontas, al ser las luces entre pórticos más reducidas, sumado a que el ancho del edificio es mucho menor, la losa tiene canto constante de 1.50 m.

Al Wakra, sin embargo tiene una cimentación profunda, a pesar de la buena competencia que tiene el terreno. Este hecho se debe a que bajo la estación (es una estación elevada) serán construidos unos túneles excavados a cielo abierto (Figura 9).



**Figura 9. Cimentación de la estación de Al Wakra entre dos túneles**

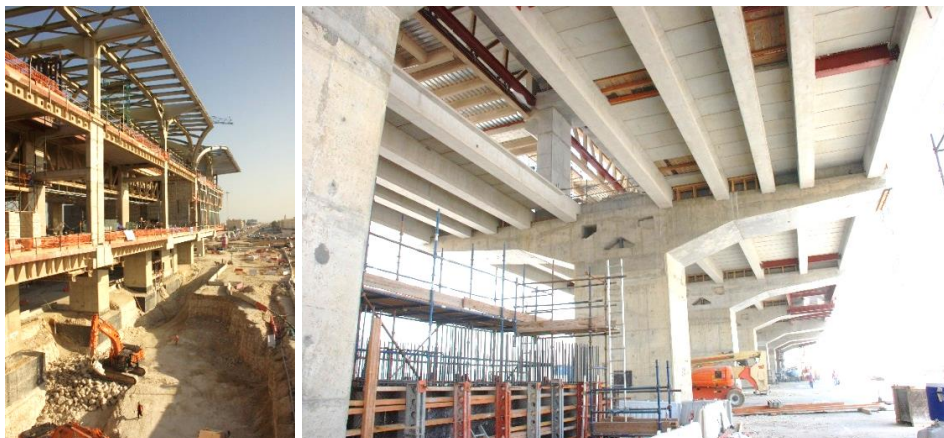
Un vez que se realice la excavación del túnel, los pilotes funcionarán como exentos entre la cota mínima de excavación y el encepado. Este hecho permite independizar prácticamente en su totalidad la construcción de la estación de la del túnel, hecho que era determinante dado que la construcción de dicho túnel es gestionada por una administración diferente de Qatar Rail. Esta cimentación se realiza con encepados de 3 m de canto y pilotes de 2 m de diámetro.

### 5. Pilas martillo

Dentro de las tipologías de estaciones elevadas en el Metro de Doha, una de ellas es la soportada por pilas martillo. Esta solución es bastante habitual, pues permite la integración de una estación en una calle, sin producir ningún tipo de reducción en el número de carriles.

En el caso de la estación de Al Wakra, la estación se apoya en nueve pilas separadas 20 metros entre sí. Salvo las pilas extremas, cuya luz es menor, el resto consta de dos dinteles postesados en voladizo, con una longitud de 10 m. El canto de estos dinteles varía entre los 1.5 m y los 3.2 m en las pilas tipo, y entre 2.2 m. y 3.75 m. en las pilas en la que se apoyan las pasarelas. La sección es en T invertida, siendo su ancho menor 2.5 m y el mayor 3.5 m.

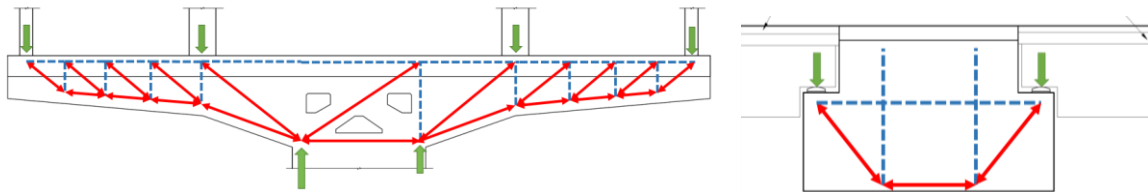
Dada la cuantía de postesado en los dinteles, este se hizo por fases teniendo en cuenta las cargas de la estructura en cada momento para evitar rotura en vacío. Cabe destacar, que en algunos casos, fueron determinantes para estas fases de tesado, las cargas temporales de la viga lanzadora que pasó sobre la estación. En todos los casos, la segunda fase de postesado se hizo sin haber hormigonado el forjado que se encuentra a nivel de estas pilas, con el fin de reducir los efectos hiperestáticos que produce en el resto de la estructura ya ejecutada en el momento del tesado.



**Figura 10. Pilas martillo en la estación de Al Wakra**



Debido a la gran concentración de cargas puntuales en la pila martillo y a la necesidad de huecos que la atravesaran, existían múltiples regiones D dentro de estos elementos. A consecuencia de este hecho, se elaboraron múltiples sistemas de bielas y tirantes. En la Figura 11 se muestra el sistema de entrada de carga por parte de las vigas y el sistema de bielas y tirantes elaborado para la colocación de los huecos en la pila.



**Figura 11. Esquema de bielas y tirantes en la pila martillo**

## 6. Pórticos

La tipología de los pórticos es muy diferente en las estaciones de Ras bu Fontas respecto a EZ y Al Wakra. En Ras bu Fontas, las vigas de los pórticos son las encargadas de llevar las cargas desde los forjados hasta los soportes. Dado que tienen una carga elevada y una luz de 14 metros, en algunos casos son vigas postesadas, hormigonadas en dos fases, dado que la parte final de la viga se hormigona a la vez que la capa de compresión de los forjados. Las vigas longitudinales suelen ser únicamente para el arriostramiento del pórtico.

En el caso de Economic Zone y Al Wakra, las vigas del pórtico en los niveles superiores (*Platform* y *Underplatform*) simplemente sirven como arriostramiento, siendo las vigas y celosías longitudinales las que llevan las cargas hasta los soportes.

En el caso de estas dos estaciones, la complejidad de estos pórticos radica principalmente en la geometría de sus nudos. Estos tienen generalmente ménsulas cortas en su dirección longitudinal para el apoyo de las celosías, y cartabones en dirección transversal para rigidizar el funcionamiento transversal (Figura 12). En el caso de las alineaciones exteriores de soportes, a esto hay que añadir el apoyo de la cubierta metálica, que se materializa con un soporte metálico embebido en el soporte de hormigón.



**Figura 12. Nudos de pórticos en Al Wakra y EZ**

## 7. Colocación de dovelas con viga lanzadora

Los viaductos de este tramo de Metro han sido construidos mediante dovelas de hormigón, y montadas con vigas lanzadoras superiores, que se apoyan en las sucesivas pilas. En el caso de las estaciones de Economic Zone y Al Wakra, dicha viga se apoyaba en los pórticos de la estación. El apoyo de la viga lanzadora en el pórtico era excéntrico, lo cual producían importantes flexiones en los pórticos mismos, así como importantes torsiones en las pilas martillo de Al Wakra, que en muchos casos podían ser dimensionantes.



**Figura 13. Viga lanzadora pasando por la estación de EZ**

## 8. Conclusiones

Doha ha dado un importante impulso a su Red de Transportes, construyendo un sistema de metro desde cero. Este crecimiento lo ha hecho tratando dar una seña de identidad arquitectónica a todas sus estaciones, basada en la tradición del país, pero sin perder de vista cierta innovación y modernidad.

Este sello ha generado en muchas ocasiones arquitecturas que tratan de ser monumentales, sobre todo por el gran tamaño de estos edificios, que requieren estructuras relativamente complejas, pero a su vez perfectamente encajadas con todo el diseño conjunto de la estación.

## 9. Participantes

*Propiedad:* Qatar Rail

*Construcción:* FYAP ( FCC-Yuksel-Archirodon-Petroserv JV)

*Proyecto:* Tysa – Sener JV

*Proyecto de estructuras y asistencia técnica a la construcción:* MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo Tysa)

## Referencias

[1] <https://www.qr.com.qa/English/Projects/Pages/DohaMetro.aspx>

[2] <http://www.unstudio.com/projects/qatar-integrated-railway-project-qirp>

[3] EN 1991-1-7 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-7: General actions – Accidental actions