

Elementos metálicos singulares de las estaciones de la Red Line South del metro de Doha, Catar

Steel structures 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

Ángel VIDAL VACAS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
MC2 Estudio de Ingeniería
Ingeniero
angel.vidal@mc2.es

Álvaro SERRANO CORRAL

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
MC2 Estudio de Ingeniería
Director Técnico
alvaro.serrano@mc2.es

Alejandro YUSTRES REAL

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
MC2 Estudio de Ingeniería
Ingeniero
alejandroyustres@mc2.es

Alberto CURBELO DÍAZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
MC2 Estudio de Ingeniería
Ingeniero
alberto.curbelo@mc2.es

RESUMEN

La realización de tres estaciones de metro (*Economic Zone, Ras Bu Fontas, Al Wakra*) forma parte del proyecto de construcción de la nueva línea de metro elevado Línea Roja Sur de Doha, en Catar. En el diseño de estas estaciones, la estructura metálica representa una parte importante, dada la combinación de geometrías no regladas en las cubiertas de dichas estaciones, además de las elevadas luces que tienen. También existen importantes celosías para resolver vanos superiores a 20 m, tanto dentro del cuerpo de las estaciones, como en las pasarelas que dan acceso a la misma.

ABSTRACT

The execution of three metro stations (*Economic Zone, Ras Bu Fontas, Al Wakra*) is part of the construction project for the new elevated Red Line South Doha in Qatar. In designing these stations, the metal structure represents an important part of it, due to the combination of non-ruled geometries in the roofs of those stations, in addition to the high spans that they have. There are also important trusses to solve spans greater than 20 m, both inside the body of the stations, as well as footbridges that give access to them.

PALABRAS CLAVE: estructura metálica, apoyos mecanizados, cubierta, celosía metálica.

KEYWORDS: Steel structure, rocker bearings, roof, steel truss.

1. Introducción

Catar determinó que debía dar un importante impulso a sus infraestructuras, y entre toda esta inversión, el metro de la ciudad de Doha es uno de los ejemplos más destacados, pues se construye una red completa desde cero, con 37 estaciones y 3 líneas en su primera fase. Las estaciones referidas en el presente artículo (*Economic Zone, Ras Bu Fontas, Al Wakra*) están incluidas en la conocida como Red Line y se sitúan en la parte sur de la misma.

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. El contenido de la presente comunicación se centrará en la descripción de los principales elementos metálicos del proyecto, destacando los condicionantes más importantes que se han encontrado en el diseño como la protección de dichos elementos contra el fuego y contra la agresividad ambiental.

2. Planteamiento de la estructura

2.1. Concepto arquitectónico

Qatar Rail, con la intención de que su red de metro tuviera una marca reconocible, encargó a UN Studios la elaboración de un *Architectural Branding Manual (Manual de referencia arquitectónico)*, el cual recoge las líneas del diseño arquitectónico para las diferentes tipologías de estaciones, tanto elevadas como subterráneas, el cual debe ser particularizado para cada una de las estaciones.

Dentro del proyecto de las estaciones elevadas, las cubiertas de las estaciones como de los edificios de acceso, tienen un diseño arquitectónico muy marcado tanto en texturas como en formas geométricas, aportando gran parte de la identidad a las estaciones. Los grandes voladizos así como las formas no regladas, hacen muy reconocible el sello arquitectónico.



Figura 1. Render del Branding elaborado por UN Studios (derecha) [1]

La complejidad geométrica de estos elementos hace necesario el empleo de herramientas de trabajo en tres dimensiones, y puesto que el cliente también requería que el proyecto fuera desarrollado empleando la tecnología BIM, se ha empleado esta herramienta en la coordinación de equipos. Dicha dificultad geométrica se debe fundamentalmente a la diferente curvatura de la capa superior e inferior del acabado, ya que son superficies no regladas ni paralelas entre sí, además de las grandes luces. Todo ello ha tenido gran influencia en la solución final elegida, pues en algunos puntos el espacio disponible era muy estricto.

2.2. Agresividad ambiental y durabilidad

El diseño de los elementos metálicos se ha llevado a cabo considerando los exigentes requerimientos del cliente, Qatar Rail, y las condiciones ambientales extremas del entorno de las estaciones.

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

A este hecho hay que sumar la proximidad del mar, lo cual provoca que haya una humedad media del 70%, con picos hasta 100%. Además, hay una concentración de cloruros bastante elevada en el ambiente.

A pesar de este clima tan agresivo, la vida útil exigida a la estructura es de 120 años. Este hecho implica que sea necesaria la definición de una estrategia de mantenimiento de la protección de elementos metálicos.

Asimismo se elaboró un estudio de fiabilidad para estudiar el efecto del incremento de la vida útil sobre los coeficientes de mayoración, estudio 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.

En algún caso, la reposición o mantenimiento de algunos elementos es imposible, dado que se encuentran en algún punto que no sea accesible en el futuro y/o no se pueda reemplazar porque supondría una operación que dañaría algún elemento de la estación. Un par de ejemplos de estos elementos son:

- Apoyo de las vigas prefabricadas del forjado del vestíbulo en la estación de Al Wakra
- Apoyos de la cubierta en los elementos de hormigón, realizando materialmente una rótula con topes laterales. Se desarrolla más este elemento en el apartado 7.

2.3. Resistencia al fuego

Uno de los requerimientos definidos por Qatar Rail era garantizar una resistencia al fuego de 180 minutos para todos los elementos estructurales, lo cual es un parámetro muy limitante a la hora de su dimensionamiento. Dicho requisito se ha alcanzado utilizando las siguientes medidas de protección:

- para elementos ocultos (recubiertos por acabados arquitectónicos): una capa de vermiculita, de base cementosa para elementos semi-expuestos y de base de yeso para elementos interiores;
- para elementos vistos: una capa de pintura intumescente.

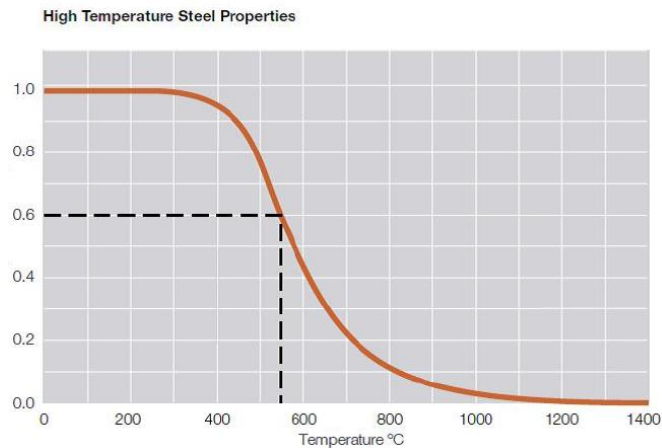


Figura 2. Reducción de la resistencia del acero con la temperatura (Tabla 3.1 de [2]).

La temperatura de diseño que podían alcanzar los elementos metálicos tras 3 horas de fuego se ha fijado en 550°C, valor necesario para definir los espesores del material de protección. Este valor corresponde a una reducción de resistencia del acero igual al 62.5% (Tabla 3.1 [2]).

Dicha reducción coincide aproximadamente con la relación α de cargas distribuidas entre situación accidental de fuego ($q_{Ed,fire}$) y situación permanente de ELU ($q_{Ed,STR}$, carga con la cual se han comprobado todos los perfiles, según [3]). Si comprobamos esta hipótesis con valores de cargas representativos del proyecto, tenemos:

$$q_{Ed,fire} = q_{peso} + q_{carga\ muerta} + 0.7 q_{sobrecarga} = 5 + 6 + 0.7 \cdot 5 = 14.5 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

$$q_{Ed,STR} = 1.35 q_{peso} + 1.35 q_{carga\ muerta} + 1.6 q_{sobrecarga} = 22.85 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

$$\alpha = q_{Ed,fire} / q_{Ed,STR} = 0.63 \quad (3)$$

Nótense el coeficiente de 1.6 aplicado a las sobrecargas, como explicado en el apartado 2.2 sobre la durabilidad.

Como consecuencia, se puede establecer la temperatura de 550°C como referencia para los elementos que funcionan a flexión, sin tener que hacer cálculos en situaciones accidentales de fuego. Adicionalmente, para los elementos comprimidos, se ha considerado que también el modulo elástico se reduce al 45.5% con una temperatura de diseño de 550°C (Tabla 3.1 [2]). Dicha reducción influye en las comprobaciones de pandeo de los soportes, que se han comprobado según las fórmulas del Eurocódigo 3 [3] en situación accidental de fuego.

Reducir ulteriormente la temperatura de diseño respecto a los 550°C elegidos habría incrementado innecesariamente el espesor de la protección ignífuga, y por lo tanto el coste.

Entrando en detalle en los productos elegidos para la protección, hay una gran diferencia tanto en método de aplicación, coste, como propiedades de ambos productos. En general, la proyección de vermiculita es un producto más económico, más fácil de aplicar y con mejores prestaciones, pero su acabado no es muy estético. La pintura intumescente, puede tener diferentes acabados, pero también un alto coste y una aplicación más compleja. Otra dificultad añadida de estos productos es la no existencia de un elevado número de productos en el mercado que tengan certificados de ensayos con la curva de fuego de la norma BS476 (curva de fuego normalizada equivalente a la norma EN 1363-1) que garanticen los 180 minutos.

Finalmente, hay que resaltar que cuando se ha de proteger perfiles metálicos con pintura intumescente durante periodos tan largos, la masividad puede ser dimensionante del propio perfil. Esto se debe a que estos productos requieren una masividad mínima para que se pueda garantizar que tras un periodo tan elevado, no se alcance dicha temperatura en el perfil. A modo de ejemplo, con el producto empleado en el presente proyecto era necesario tener una masividad mínima en perfiles en doble T de 70 m^{-1} en vigas y 105 m^{-1} en columnas. Este hecho requirió que se tuvieran que incrementar las dimensiones de algunos perfiles.

3. Configuración estructural

El esqueleto estructural de todas las estaciones está constituido por pórticos de hormigón, sin embargo, gran parte de la estructura es metálica, destacando los siguientes elementos:

- zonas de forjados que no se pueden resolver con una losa maciza o de elementos prefabricados, por la presencia de huecos o para aligerar zonas en voladizo;
- unas celosías longitudinales para resolver los vanos de grandes luces entre pórticos de hormigón;
- la cubierta de los edificios de acceso (*shelters*) y la cubierta principal de las estaciones;
- las pasarelas de acceso entre *shelters* y estación, para sobrepasar el viario paralelo al metro.

4. Forjados mixtos de vigas metálicas y chapa plegada

El sistema convencional de vigas metálicas con forjado de chapa colaborante ha sido utilizado en diferentes zonas del proyecto cuando su empleo resultaba ventajoso, por la rapidez de ejecución (sobre todo por la ausencia de encofrados a grandes alturas o de apuntalamientos), siendo este uno de los principales criterios de proyecto. La flexibilidad para adaptarse a los huecos de instalaciones y la reducción de peso en zonas de voladizos han sido otros dos criterios utilizados para elegir esta solución. Un ejemplo de la necesidad de emplear forjados mixtos es el área representada en la Figura 3, que representa una zona de forjado del vestíbulo en Al Wakra. Este forjado se ha resuelto generalmente mediante vigas prefabricadas apoyadas entre pilas martillo, sin embargo, en aquellas zonas que no permitían la colocación de estas vigas, se ha resuelto con vigas mixtas de 20 m de luz, dado que el forjado mixto permite una mejor adaptación a los diferentes huecos.

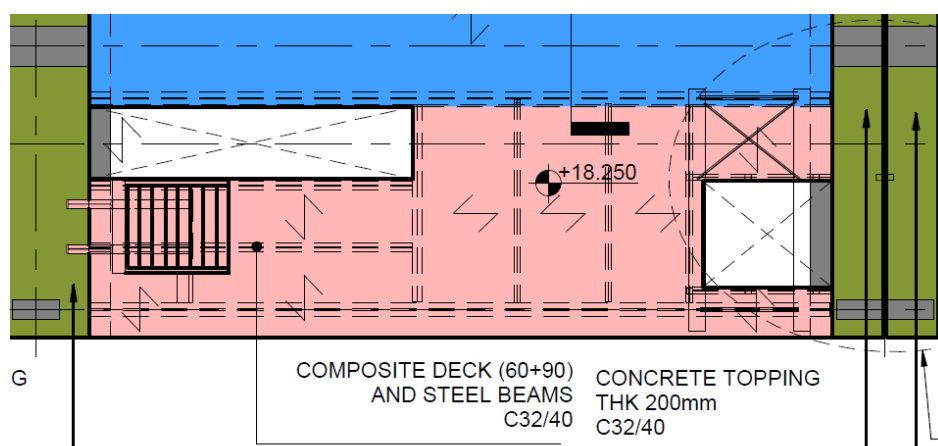


Figura 3. Forjado del nivel Concourse de Al Wakra

5. Celosías longitudinales

En las estaciones de Economic Zone y Al Wakra, los pórticos de hormigón están separados 20 m, distancia que requiere importantes cantos de estructura. Sin embargo, al no disponer de una altura libre para alojar dicho canto, se optó por disponer dos celosías longitudinales cuyo canto coincide con la distancia entre forjados (ver Figura 4), empleando el concepto megaestructural. Dado que cada cordón de la celosía coincide con la cota de cada planta, es posible tanto forjar con vigas metálicas entre ambas celosías, así como colocar placas alveolares. Una vez hormigonadas cualquiera de las soluciones estructurales, la losa resultante servirá como arriostramiento del cordón superior.

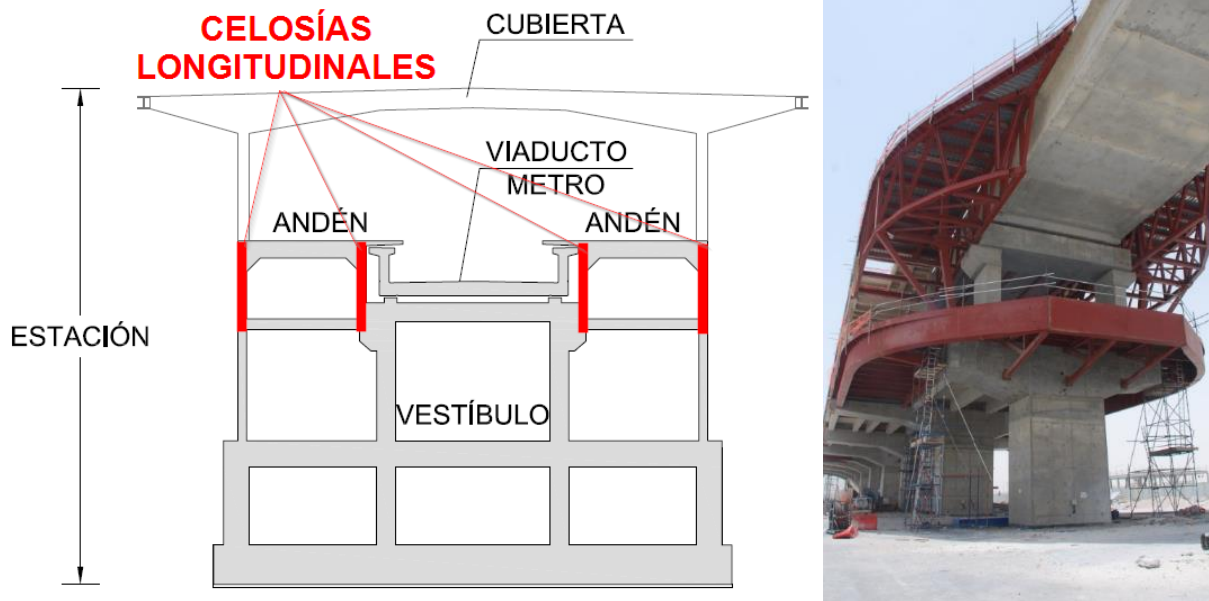


Figura 4. Celosías longitudinales en las estaciones de Al Wakra y Economic Zone

6. Cubierta de la estación

En la coronación de todas las estaciones se ha realizado una cubierta metálica que cubre el cuerpo del edificio y, en algunas estaciones, también las vías del metro.

La estructura principal está constituida por unos pórticos transversales de altura variable, algunos de ellos en forma de arco. Longitudinalmente se resuelve con potentes vigas de canto variable entre pórticos, entre las que se forjan las vigas secundarias.

Los soportes son cajones metálicos, a los cuales longitudinalmente se les añaden puntales, para reducir las luces longitudinales de las vigas y aportar rigidez al conjunto, sobre todo en los grandes voladizos de las estaciones.

La geometría variable del acabado con pendientes muy variables, junto con este gran voladizo, hizo necesario un detallado análisis del viento en la cubierta. Otro punto crítico fueron las deformaciones, sobre todo en la punta del voladizo de la cubierta. Para resolverlo se llevó el pórtico longitudinal hasta este punto para aportar una mayor rigidez y adicionalmente se aplicaron contraflechas en fabricación.

En todos los casos, se ha previsto el montaje de la estructura considerando las dimensiones máximas de transporte.

Para la construcción en obra, en primer lugar, se montaron los pórticos principales con unos muñones, que a su vez permitía el montaje de las vigas longitudinales (Figura 5) mediante uniones continuas que no permiten el deslizamiento en Estado Límite Último.



Figura 5. Uniones y montaje de las cubiertas

6.1. Cubierta de Ras bu Fontas

En esta estación, no todos los soportes de hormigón de la estación tienen correspondencia con uno metálico, pues los pórticos del edificio se sitúan cada 10 m, mientras que las luces de la cubierta varían entre 20 y 30 m. El ancho total de la cubierta es de 20 m.

La estructura está dividida por dos juntas de dilatación, con lo cual quedan dos porciones laterales de unos 60 m y una parte central de 90 m. El voladizo máximo de esta cubierta es de 19.20 m.

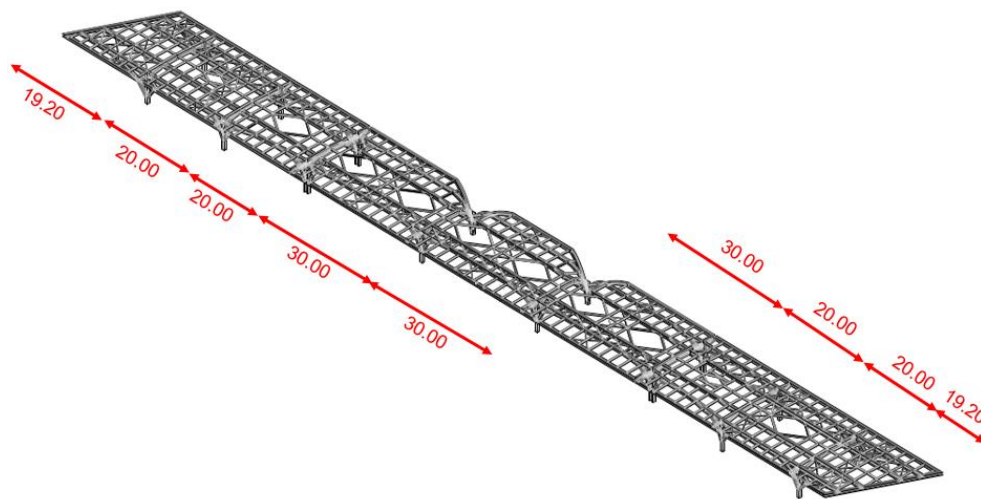


Figura 6. Geometría de la cubierta de Ras bu Fontas

Se puede observar en las Figuras 6 y 7 la existencia de dos zonas en que los pórticos son en realidad arcos. Esto ocurre tanto en los transversales como en los longitudinales. Los huecos que forman rombos en la alineación central sirven para alojar los lucernarios que darán luz natural a la cubierta.



Figura 7. Cubierta de Ras bu Fontas

6.2. Cubierta de Al Wakra y de Economic Zone

La geometría de la cubierta de Al Wakra y de Economic Zone son prácticamente iguales. Están compuestas por ocho vanos de 20 m más los voladizos laterales que tienen 24.70 m. El ancho total de la cubierta es de 33 m (véase Figura 8).

La estructura se divide en dos partes, ya que en el eje central existe una junta de dilatación materializada mediante un pórtico doble.

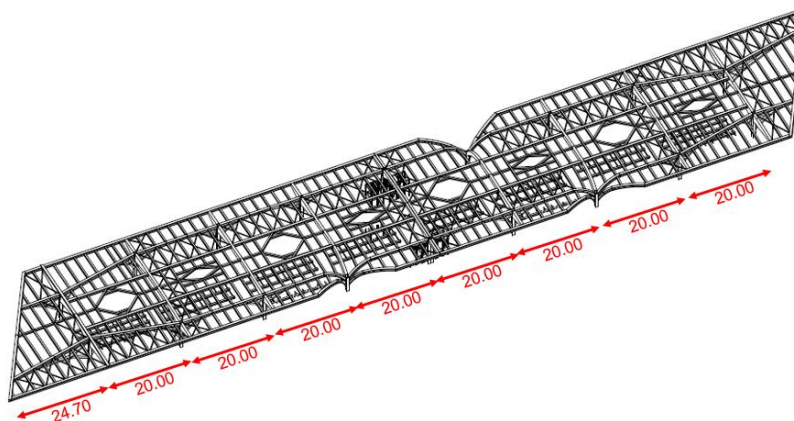


Figura 8. Geometría de la cubierta de Al Wakra y Econocmic Zone

En la Figura 9 se pueden observar la cubierta de Economic Zone.



Figura 9. Cubierta de Economic Zone

7. Apoyos esféricos de la estructura de cubierta

Con el fin de evitar los importantes momentos producidos por la descompensación debida a los voladizos de la cubierta, se decidió articular los soportes de la cubierta en su base. De este modo, los pórticos de hormigón solamente tendrían que soportar las fuerzas horizontales.

Para materializar esta unión, se dimensionaron unos apoyos mecánicos esféricos, dotados de topes laterales, capaces de transmitir las fuerzas horizontales.

Algunos de estos apoyos se encuentran expuestos al ambiente exterior, lo cual sumado a la dificultad de reposición en la vida útil de la estructura, hicieron que estos apoyos fueran diseñados en acero inoxidable del tipo 1.4462.

8. Cubiertas de los edificios de acceso (*shelters*)

Las cubiertas de los edificios de acceso (*shelters*) se apoyan longitudinalmente cada 4 m, dado que por criterio arquitectónico, se decidió hacer coincidir los soportes de estos elementos con los módulos de fachada. Por tanto la principal luz de estas cubiertas es la transversal que llega a alcanzar los 15 m.

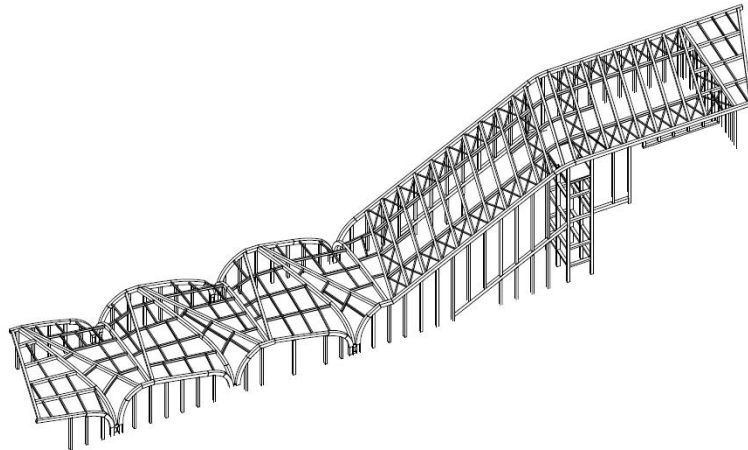


Figura 10. Cubierta del Shelter East de la estación de Al Wakra

La cantidad de geometrías diferentes de arcos y pórticos hace de esta cubierta uno de los elementos más complejos del proyecto, pues han sido necesarios un elevado número de detalles para poder materializar el montaje de esta estructura.



Figura 11. Cubierta de Shelter en Economic Zone y Al Wakra

9. Pasarelas

En todas las estaciones existen pasarelas que unen los edificios de acceso con el edificio principal. Las luces de estas pasarelas son muy variadas, pues la posición de las pilas va en función de los viales sobre los que pasan, siendo la luz máxima de 30 m, y tienen un canto total de 7.5 m.

La estructura se compone de dos celosías laterales, sobre las que se apoyan un nivel inferior y otro superior de vigas y diagonales, que cierran el conjunto. Sobre el plano inferior se eleva un forjado de chapa plegada, dejando un espacio bajo suelo que se aprovecha para el paso de instalaciones.



Figura 12. Pasarelas en Al Wakra y Economic Zone

10. Conclusiones

La morfología de cubiertas y pasarelas tienen gran importancia en el conjunto arquitectónico de las estaciones elevadas del Metro de Doha. Las superficies no regladas con contornos asimétricos generan geometrías, que sumado a las grandes luces y voladizos que forman, condicionan en gran medida el diseño estructural.

Por ello, estos elementos son un ejemplo de coordinación multidisciplinar en las que se ha buscado el óptimo estructural para resolver una edificación tan icónica para la ciudad de Doha.

11. Participantes

Propiedad: Qatar Rail

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

Proyecto: Tyspa – Sener JV

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

Referencias

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

[2] EN 1993-1-2. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design

[3] EN 1993-1-1 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings