

Diseño estructural del CETRAM y de la estación terminal de Observatorio del proyecto del Tren Interurbano México-Toluca

Structural design of CETRAM and the Observatorio terminal station of the Mexico-Toluca Interurban Train project

Carlos Llopis Camps^{*,a} y Santiago Ferri Mateu^b

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Ingeniería (Valencia, España). Ingeniero Responsable de Disciplina.

E-mail: carlos.llopis@sener.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Ingeniería (Valencia, España). Ingeniero de Proyecto.

E-mail: santiago.ferri@sener.es

RESUMEN

El futuro Centro de Transferencia Modal de Observatorio (CETRAM) está compuesto por varias infraestructuras: la estación elevada del Tren México-Toluca, tres estaciones de metro enterradas, una estación de autobuses, una estación del tren expés al Nuevo Aeropuerto Internacional y un proyecto de desarrollo urbanístico. Esto implica una compleja coordinación e integración de los diferentes paquetes, construidos en distintas fases, y modificaciones e incertidumbres de diseño debido a factores externos como la política. Esto condiciona el proceso de diseño de los sistemas estructurales cuyo resultado son estructuras con gran capacidad de adaptación a diferentes situaciones de proyecto.

ABSTRACT

The future Multi-Modal Transfer Center of Observatorio (CETRAM) is composed of multiple infrastructures: the elevated station of Mexico-Toluca railway, three underground metro stations, a bus station, an express train to New International Airport station and an urban development project. This entails a complex integration and coordination of the different packages, built in distinct phases, and many design changes and uncertainties due to external factors such as politics. This conditions the design process of the structural systems whose results are structures with great capacity to adapt to different project situations.

PALABRAS CLAVE: diseño estructural, estación elevada, infraestructuras, estructura mixta, integración
KEYWORDS: structural design, elevated station, infrastructures, composite structure, integration.

1. Introducción

El proyecto del Tren Interurbano México-Toluca (TITM) es una línea de ferrocarril que une la ciudad de Toluca de Lerdo con Ciudad de México. Se trata de un proyecto de 58 Km de longitud con 48.30 Km de viaductos ferroviarios

debido a la compleja orografía de la zona. El proyecto cuenta con 4 estaciones en el Estado de México (Zinacantepec, Pino Suárez, Tecnológico y Lerma) y 2 en Ciudad de México (Santa Fe y Observatorio).



Figura 1. Proyecto arquitectónico del CETRAM de Observatorio de noche. Fuente: TEN Arquitectos.

La estación terminal de Observatorio se ubica en la zona oeste de Ciudad de México, junto a la estación actual de Observatorio de la Línea 1 del metro y a una estación de autobuses. La estación actual de metro junto a una pasarela existente, que conecta con la estación de autobuses, tienen que ser demolidas para la construcción de la estación del TITM.

Como la línea de ferrocarril del TITM no puede acceder al centro de la ciudad, la localización estratégica del punto de intercambio de pasajeros con otros modos es fundamental [1,2]. Por este motivo, se propuso construir un Centro de Transferencia Multimodal (CETRAM) en la zona de Observatorio. El CETRAM cuenta, además de la estación elevada del TITM, con tres estaciones enterradas de metro (Línea 1, 9 y 12), la estación de autobuses existente y la futura estación del tren expés al Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM).

A consecuencia de estas nuevas construcciones, se propuso un proyecto de desarrollo urbanístico. El desarrollo urbanístico contempla la reordenación de calles y carreteras de la zona además de la construcción de nuevos edificios residenciales, oficinas, hoteles, un centro comercial y de ocio, un parking y zonas verdes. Para completarlo, será necesario construir conexiones entre las diferentes partes del CETRAM, incluyendo el Edificio Intermodal de conexión de la estación de autobuses con las estaciones de metro y la estación del TITM. De esta forma se pretende lograr una adecuada integración operacional y física entre los modos de transporte optimizando las ventajas de cada uno de ellos [3].

La administración preparó la licitación pública del Plan Maestro del CETRAM de Observatorio, cuyos finalistas fueron: Skidmore, Owings & Merrill (SOM), TEN Arquitectos y GENSLER. La licitación fue adjudicada a TEN Arquitectos (diseño arquitectónico) en colaboración con Oren Tatcher OTC (plan de movilidad urbana) y SENER Ingeniería (diseño estructural).

1.2 Descripción conceptual de los sistemas estructurales

El proyecto del CETRAM, se divide en diferentes paquetes. Este artículo trata exclusivamente del diseño estructural de los siguientes paquetes: la estación del TITM, el paso inferior de la Av. Minas de Arena y las pasarelas de conexión del CETRAM. No obstante, el diseño está muy condicionado por el resto de paquetes y proyectos del CETRAM.

La estación del TITM es una estación terminal elevada con tres niveles: nivel vestíbulo, que conecta con el resto de infraestructuras; nivel plataforma, donde termina la línea del TITM; nivel de cubierta, accesible para las personas y con zonas ajardinadas.

Las conexiones entre la estación del TITM y los edificios del CETRAM se realizan mediante

pasarelas elevadas transversales. Estas estructuras permiten el flujo de personas a nivel de vestíbulo. Además, las pasarelas orientales también conectan con el nivel de cubierta en una conexión a doble nivel.

Por otro lado, las conexiones entre la estación del TITM y las estaciones de metro se realizan mediante un nivel vestíbulo enterrado que permite el flujo transversal de personas. Además, el proyecto debe ser compatible con la movilidad urbana, especialmente con la Av. Minas de Arena. Por lo tanto, se diseña un paso inferior con tres niveles principales: nivel superior, para la circulación de vehículos a nivel calle; nivel intermedio, nivel peatonal de conexión con el metro y edificios; nivel inferior, circulación de vehículos por la Av. Minas de Arena.

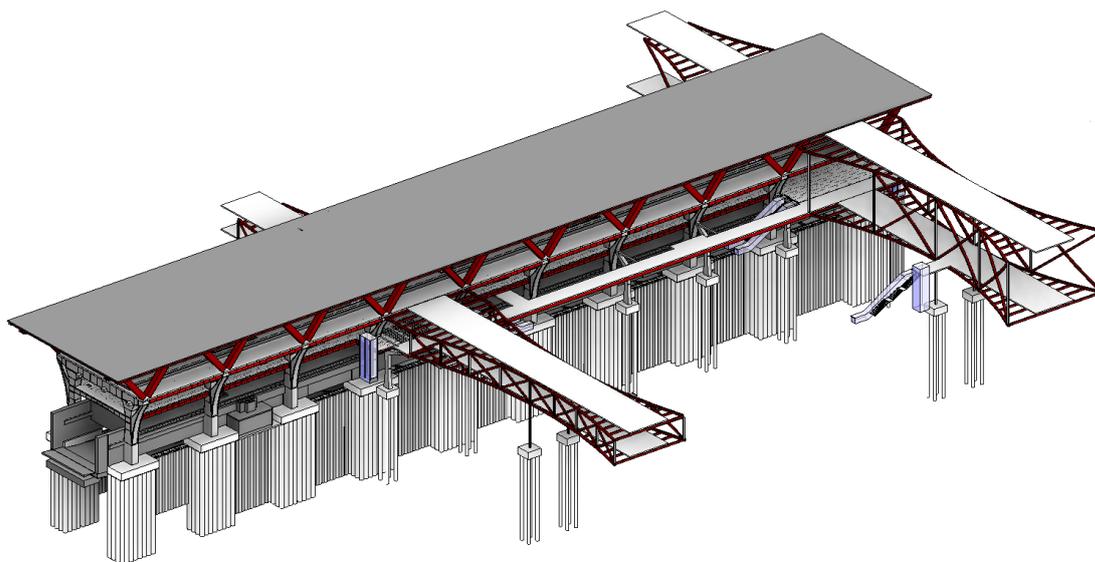


Figura 2. Sistemas estructurales diseñados: estación elevada del TITM, paso inferior de la Av. Minas de Arena y pasarelas transversales. Fuente: SENER Ingeniería.

2.1 Condicionantes derivados del CETRAM

El diseño del CETRAM de Observatorio incluye la realización de los proyectos: la estación del TITM, el paso inferior de la Av. Minas de Arena, las estaciones de metro, el edificio de conexión con la estación de autobuses, la estación del tren

expres al NAICM, el desarrollo urbanístico de la zona y las conexiones entre todos los proyectos mediante pasarelas y pasos enterrados.

En esta situación, uno de las condiciones del proyecto es que la afeción al resto de la ciudad tiene que ser mínima. Como se ha mencionado anteriormente, existen diversas infraestructuras localizadas en un espacio restringido por el entorno urbano de la zona de Observatorio y, por lo tanto, la integración de los proyectos resulta muy compleja.

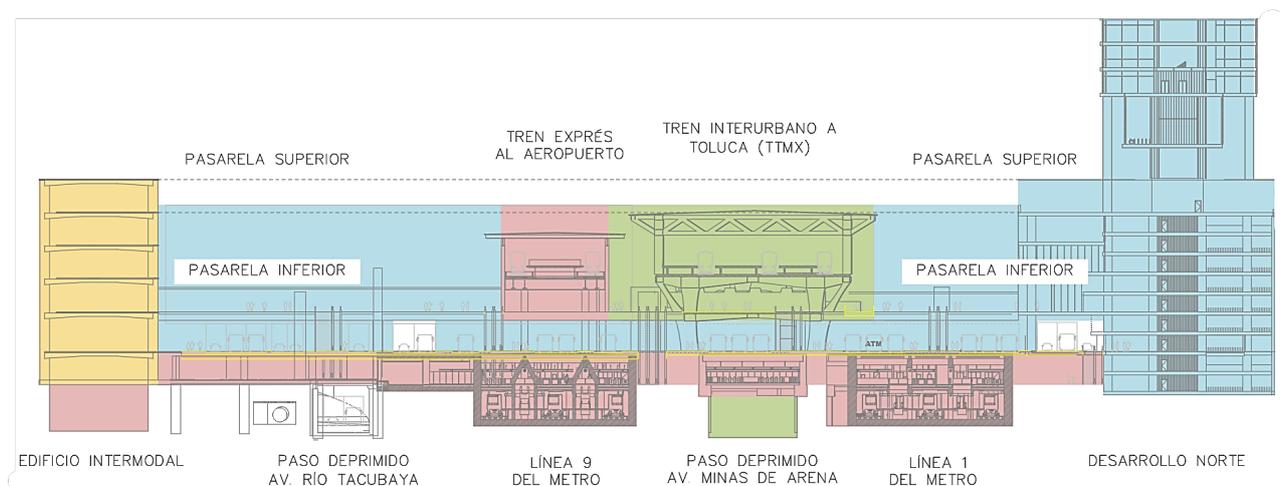


Figura 3. Sección transversal esquemática de los proyectos del CETRAM de Observatorio. Fuente: OTC.

Los proyectos del CETRAM no tienen un único organismo responsable que realice la integración, sino que existen múltiples organismos responsables para las diferentes partes. Además, algunos de los proyectos son propiedad de diferentes Administraciones Públicas mientras que los desarrollos urbanísticos son de propiedad y financiación privada. Esto aumenta la dificultad de coordinación de los proyectos ya que no existe una coordinación global para todo el CETRAM.

El desfase temporal entre los proyectos y la incertidumbre de las situaciones futuras, implica que el diseño del CETRAM evoluciona con el paso del tiempo. Como consecuencia de esta evolución, se producen modificaciones durante la fase de diseño que pueden cambiar las condiciones de contorno de los sistemas

estructurales. Por este motivo, se ha tenido que rediseñar varias veces los sistemas estructurales durante la fase de diseño como consecuencia de los cambios.

Otro de los condicionantes derivados del CETRAM es la importancia del proyecto para la Ciudad de México y los habitantes de la zona de Observatorio. Es un proyecto de gran magnitud y se convertirá en el punto de intercambio de transporte modal más importante de toda la ciudad. La influencia de la opinión de los ciudadanos y los intereses políticos en el proyecto y en los desarrollos urbanísticos, tienen un gran impacto en el desarrollo del diseño ya que está expuesto a cancelaciones, modificaciones y paralizaciones que son muy difíciles de predecir.

La débil conexión entre los eslabones de toda la cadena de la estación intermodal implica una inadecuada planificación de la misma y, por ello, una reducción del nivel de servicio y uso de la estación [4].

A todos los requerimientos anteriores, hay que añadir que la Ciudad de México se encuentra en una región de sismicidad muy alta y con una calidad baja del subsuelo. Esto también condiciona el diseño de los sistemas estructurales y sus cimentaciones, así como en el diseño de la estructura del paso inferior.

2.2 Requerimientos de diseño del paso inferior

El principal condicionante de diseño del paso deprimido es que tiene que conectar diferentes infraestructuras entre sí y permitir el tráfico de vehículos, de forma simultánea.

El nivel intermedio debe ser un nivel enterrado de acceso peatonal cuya función principal es proporcionar conexión transversal entre las estaciones de metro, como vestíbulo de las estaciones, y entre los edificios del desarrollo norte y el edificio de intercambio modal con la estación de autobuses. A su vez, cuenta con escaleras de acceso directo al nivel calle y al nivel vestíbulo de la estación del TITM.

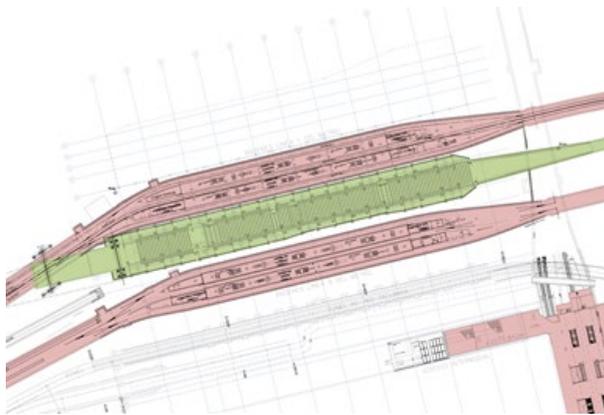


Figura 4. Nivel plataforma subterráneo. Paso inferior (verde) y estaciones de metro (rosa). Fuente: OTC.

Por tanto, el paso inferior tiene que ser compatible con la estructura y cimentación de la estación elevada y, también, con los accesos al metro en el futuro.

A consecuencia de la ubicación de estos puntos de entrada y de salida, el paso inferior atraviesa una carretera denominada Sur 122. Esa carretera debe reponerse una vez completado el paso inferior, por lo que, la estructura del paso

inferior tiene que ser compatible con una solución estructural que permita la circulación de vehículos por la carretera Sur 122.

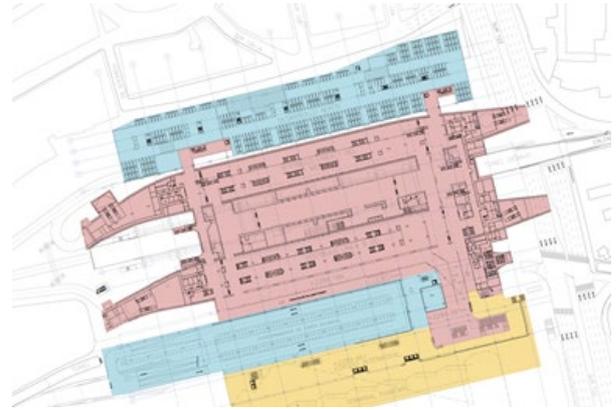


Figura 5. Nivel vestíbulo subterráneo. Estaciones de metro (rosa), Desarrollo Norte (azul) y Edificio Intermodal (amarillo). Fuente: OTC.

Por último, las elevadas dimensiones de los gálibos libres necesarios para el paso inferior condicionan el diseño de la estructura tanto en la fase final como en las fases temporales de construcción. Esto se debe a que el nivel inferior de vehículos está a 15 metros de profundidad y que el ancho máximo del paso inferior es superior a los 15 metros.

El principal requerimiento de diseño es que es una estación terminal y debe disponer de capacidad suficiente para albergar tres vías de tren y permitir el movimiento de personas desde la estación hacia el resto de modos de transporte del CETRAM.

Para el diseño de la estación elevada del TITM, hay que tener en cuenta que en la parte inferior se encuentra el paso inferior y las estaciones de metro. Por tanto, las necesidades de gálibos y espacios libres en el nivel enterrado condicionan la ubicación de las cimentaciones y de las columnas que sustentan la estación, con una separación transversal mínima de 22 metros y puntos de apoyo separados longitudinalmente cada 25 metros.



Figura 6. Nivel vestíbulo elevado. Estación TITM (verde), Tren Exprés (NAICM), Desarrollo Norte y pasarelas (azul) y Edificio Intermodal (amarillo).
Fuente: OTC.

En cuanto a los condicionantes en el nivel vestíbulo, se debe proporcionar zonas transitables en una zona exterior a los puntos de apoyo previstos para las columnas de la estación. Estas zonas se usan para ubicar los elementos de circulación vertical entre los distintos niveles, con anchos máximos en voladizo de hasta 10 metros.

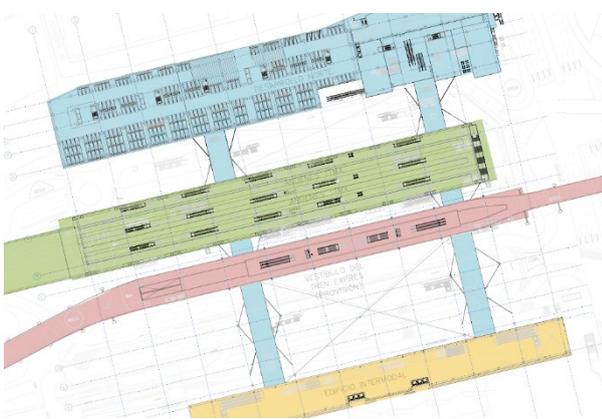


Figura 7. Nivel plataforma elevado. Estación TITM (verde), Tren Exprés (NAICM), Desarrollo Norte y pasarelas (azul) y Edificio Intermodal (amarillo).
Fuente: OTC.

Finalmente, la cubierta de la estación debe ser accesible para personas y debe tener zonas ajardinadas, lo que implica disponer una gran cantidad de peso en la parte superior de la estación. Esto es crítico para el diseño del sistema estructural de la cubierta. Además, el canto máximo permitido para la cubierta es de 3.30 metros y está limitado por los 7.50 metros de gálibo ferroviario, siendo la altura total desde la plataforma ferroviaria de 11 metros aproximadamente.

El principal requerimiento de diseño de las pasarelas es permitir el flujo de personas entre los edificios del CETRAM a través de estructuras elevadas. En total se diseñan cuatro pasarelas transversales.

Estas conexiones transversales se realizan mediante dos tipos de estructuras: doble nivel, conectando el nivel vestíbulo y el nivel de cubierta; nivel único, conectando únicamente el nivel vestíbulo. Por tanto, las pasarelas de doble nivel tienen una altura aproximada de 18 metros y las pasarelas de nivel único tienen una altura aproximada de 7.50 metros.

Las pasarelas deben tener capacidad suficiente para permitir el flujo de personas. Para ello, las dimensiones de las pasarelas son grandes ya que requieren anchos libres de 12 metros. Por lo que respecta a las longitudes, existen dos tipos de pasarelas: las pasarelas situadas en el lado Norte, con luces de 45 metros; y las pasarelas situadas en el lado Sur, con luces de 90 metros.

Con la nueva configuración urbana de viales en el nivel calle y la ubicación de las estaciones de metro enterradas, los puntos de apoyo de las pasarelas están muy limitados. Esto supone un gran condicionante de diseño para la estructura, ya que las pasarelas del lado Norte no pueden disponer apoyos intermedios, mientras que en el lado Sur tienen un único apoyo en la mitad de su longitud con vanos de 45 metros de longitud, aproximadamente.

Además de los puntos de soporte intermedios, en los extremos de las pasarelas se tienen que sustentar sobre las estructuras de otras partes del CETRAM. La estructura de las pasarelas debe unirse a los pórticos principales de la estación del TITM y a las columnas principales de los edificios del desarrollo norte y el edificio de intercambio modal.

Finalmente, con el objetivo de permitir la compatibilidad con situaciones futuras del proyecto, se debe prever que la estructura de las pasarelas permita la construcción de la futura estación del tren exprés al NAICM y que no haya interferencias entre las pasarelas y la línea en viaducto al NAICM.

3. Diseño conceptual de los sistemas estructurales

3.1 Diseño estructural del paso inferior

El principal problema a resolver para el paso inferior es la complejidad de la compatibilidad de la estructura en todas las fases constructivas. Por ello, se realiza un estudio del proceso constructivo para determinar la solución compatible con el procedimiento *top-down*.

Para la excavación de la parte interior del paso inferior, se diseña un sistema principal de contención del terreno mediante muros pantalla de pilotes de hormigón armado de más de 30 metros de profundidad, para poder ubicar el nivel inferior de vehículos a 15 metros de profundidad. Estos muros están formados por los pilotes del muro pantalla y por los pilotes de la cimentación profunda de las columnas de la estación elevada. Su función es, además de contener el terreno, servir como muros definitivos del paso inferior.

No obstante, como el nivel peatonal enterrado debe permitir las conexiones transversales, el muro pantalla no puede construirse desde el nivel calle, ya que no puede ser demolido. Por tanto, el muro pantalla se construye enterrado y, por encima del propio muro pantalla, se construyen muros de hormigón armado que, una vez se ejecuten las ampliaciones de las líneas de metro, deben ser demolidos parcialmente para permitir el paso transversal de personas. De esta forma, se diseñan dos tipos de muros: los muros definitivos, los cuales no serán demolidos; y los muros provisionales, que serán demolidos en una fase futura.

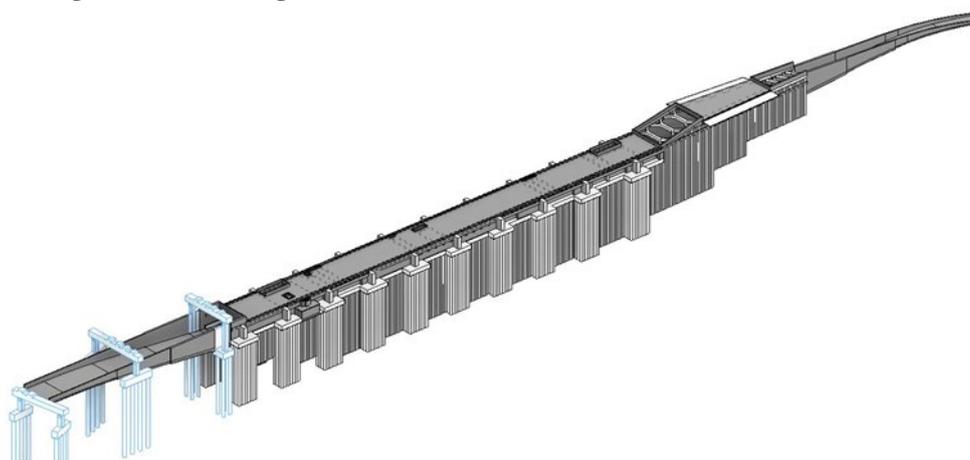


Figura 8. Vista tridimensional de la estructura del paso inferior de la Av. Minas de Arena.
Fuente: SENER Ingeniería.

La necesidad de construcción de estos muros y de las bases de las columnas de la estación, por encima del muro pantalla, implica la necesidad de un sistema secundario de contención de tierras. Para este problema, se

diseña un sistema de pantallas de micropilotes con anclajes contra el terreno para contener las tierras mientras se construyen los muros y las bases de las columnas de la estación.

Además, como a consecuencia de la gran profundidad de excavación, se requiere disponer dos niveles de puntales metálicos provisionales durante los procesos de excavación del terreno en la parte interior del paso inferior. Finalmente, una vez construida la losa de fondo, la losa del nivel intermedio y la losa superior, se retiran los puntales temporales. De este modo, las losas de los niveles enterrados funcionan como apoyos definitivos del muro pantalla.

Para el paso transversal de la Carretera Sur 122, el muro pantalla se ejecuta desde el nivel calle. En este caso, solo existe una losa de fondo que proporciona estabilidad a los muros pantalla porque no es posible disponer ningún sistema de arriostramiento horizontal sin interferir con el tráfico de vehículos. Así que, se diseña un sistema de soporte definitivo en el nivel superior a base de estampidores de hormigón armado. Para la carreta Sur 122, se diseña una estructura

con vigas prefabricadas de hormigón pretensado para reducir los plazos de ejecución y facilitar la reposición de la carretera.

En los extremos, las entradas al paso inferior se realizan mediante muros in situ de hormigón armado desde el nivel calle hasta el inicio de los muros pantalla.

3.2 Diseño estructural de la estación elevada

En la estructura de la estación elevada, el principal objetivo es definir sistemas estructurales que sean capaces de resistir las cargas gravitatorias y las cargas sísmicas. Para resolver este problema, se realiza un estudio de alternativas dividido en dos partes: por un lado, el sistema estructural principal, de los niveles vestíbulo y plataforma; por otro lado, el sistema estructural de la cubierta.

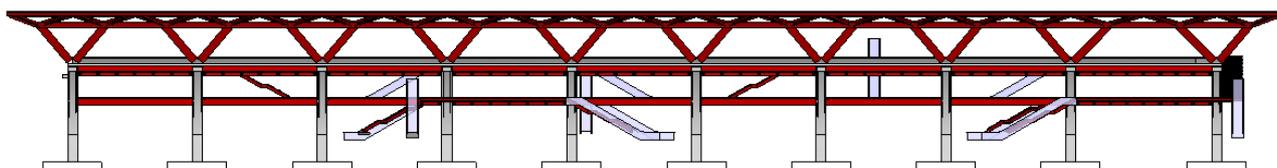


Figura 9. Sección longitudinal de la estructura de la estación elevada del TITM.

Fuente: SENER Ingeniería

Para el sistema principal, se diseña una estructura formada por pórticos mixtos transversales separados 25 metros, cuya posición está condicionada por el paso inferior, unidos entre sí por tres vigas mixtas en cajón cerrado de hasta 2.40 metros de canto total. Este conjunto de pórticos y vigas longitudinales proporciona suficiente rigidez para que el comportamiento frente a sismo sea adecuado. Para las cargas gravitatorias, se disponen vigas mixtas secundarias unidas a las vigas cajón separadas 3.70 metros. De esta forma, las cargas gravitatorias se transmiten desde las vigas secundarias a las vigas longitudinales y, al final, a los pórticos principales.

Para las zonas exteriores, se disponen vigas transversales en voladizo de hasta 9 metros y con la misma separación que las vigas

secundarias. Estas vigas secundarias y vigas en voladizo se diseñan a base de secciones mixtas con perfil metálico en I de canto variable

Por tanto, el sistema estructural consiste en pórticos en las dos direcciones para dotar al sistema de la rigidez suficiente para resistir las acciones gravitatorias y sísmicas.

En cuanto al sistema estructural de la cubierta, es necesario diseñar un mecanismo de rigidez longitudinal que transmita las cargas a las columnas principales de la estación. Para ello, se diseña un sistema estructural arbóreo, bifurcando las columnas de la cubierta en forma de V hasta los 12.50 metros de separación, y una celosía plana longitudinal sobre estas columnas, compuesta de vigas metálicas en cajón rectangular.

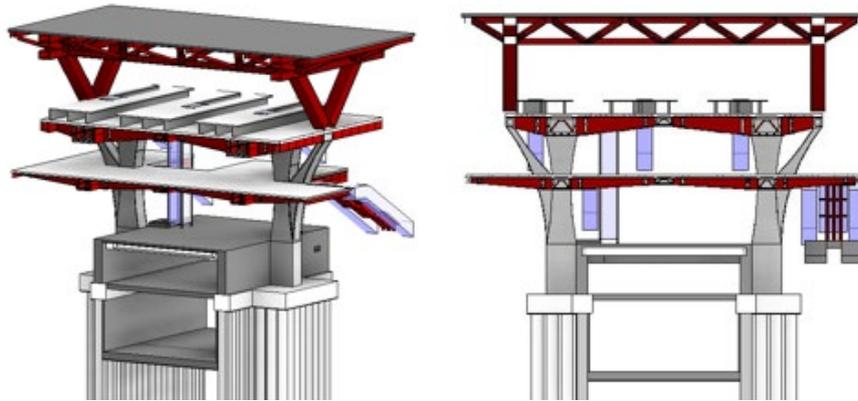


Figura 10. Sistemas de la estación y el paso inferior: vista 3D y sección. Fuente: SENER Ingeniería.

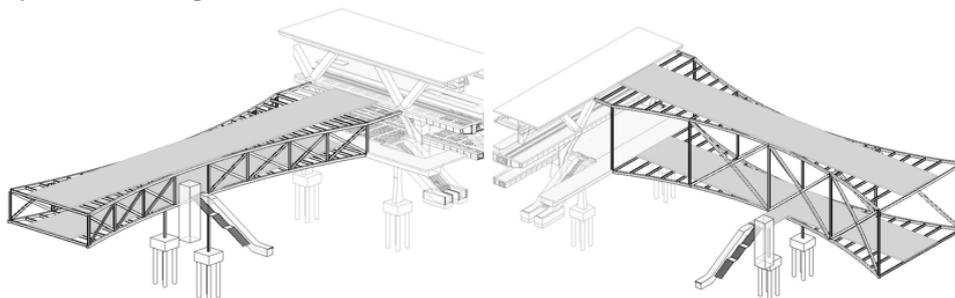
El mecanismo de rigidez transversal de la cubierta consiste en una celosía espacial de 3 metros de canto compuesta por tetraedros de acero de base rectangular unidos entre sí. De esta forma, los cordones de la celosía espacial quedan unidos transversalmente a las celosías planas longitudinales. Además, en la capa superior se define una losa de hormigón armado de 25 centímetros dando como resultado una estructura mixta bidireccional. Así, las cargas gravitatorias en cubierta se transmiten a través de la celosía espacial hasta las celosías longitudinales que se apoyan sobre las columnas. Frente a la acción sísmica, la cubierta actúa a modo de diafragma en ambas direcciones transmitiendo las cargas hasta los pórticos principales.

3.3 Diseño estructural de las pasarelas

Las pasarelas requieren sistemas estructurales que transmitan las cargas a las columnas y pórticos principales de la estación del TTM y de los edificios adyacentes. Las pasarelas tienen 12

metros de anchura mientras que las columnas de estas estructuras están separadas 25 metros. Por este motivo, la estructura de las pasarelas se diseña con una curvatura en planta hasta alcanzar los 25 metros.

Estas estructuras longitudinales se diseñan como dos celosías con cruces de San Andrés y montantes verticales entre arriostramientos. Los cordones longitudinales de las celosías son vigas de acero rectangulares en cajón de hasta 1 metro de canto y el resto de elementos son vigas de acero en I. En este sistema estructural, las cruces de San Andrés son muy importantes para proporcionar rigidez frente a las cargas sísmicas y, por otro lado, los montantes verticales son necesarios para transmitir las cargas gravitatorias hasta los extremos. Con esta solución estructural, se pueden eliminar las diagonales en aquellas partes donde existan interferencias con el proyecto del tren exprés al NAICM y con las escaleras y elevadores desde el nivel calle a las pasarelas.



En cuanto a la solución estructural para el tablero de las pasarelas, se propone una estructura mixta formada por vigas en I espaciadas transversalmente cada 4 metros, aproximadamente. Al igual que con la estructura de la cubierta, en la capa superior se diseña una losa de hormigón armado de 30 centímetros. La longitud de las vigas transversales es variable para ajustarse a la curvatura en planta de las celosías laterales. Para el nivel superior de las pasarelas, la solución estructural es idéntica al tablero inferior. Se diseña un tablero mixto con vigas transversales y una losa de hormigón.

De esta forma, las cargas se resisten mediante un tablero mixto que transmite las cargas a las celosías longitudinales que se sustentan sobre los apoyos intermedios y la estructura principal de la estación y los edificios.

4. Conclusiones

Entre las conclusiones que se pueden extraer del diseño de este proyecto, la más importante es que en proyectos de gran magnitud y complejidad técnica, como es el proyecto del Centro de Transferencia Modal de Observatorio, realizar un diseño conceptual de las estructuras durante las fases iniciales del proceso de diseño es fundamental para evitar problemas futuros en el diseño estructural.

No obstante, para realizar un diseño conceptual adecuado se requieren de datos fiables y certeros sobre del proyecto y sus condicionantes desde las fases iniciales del proceso de diseño. En caso contrario, como en este proyecto, si existen grandes modificaciones en las condiciones del proyecto, el diseño conceptual puede no ser válido y sea necesario rediseñar los sistemas estructurales.

En el caso de que existan grandes incertidumbres y posibles modificaciones de proyectos durante el diseño, el ingeniero

diseñador debe prever unos márgenes de seguridad adicionales adoptando hipótesis conservadoras en el diseño conceptual que permitan tener mayor flexibilidad ante los cambios del proyecto y poder adaptarse a todas las posibles situaciones futuras.

Por el contrario, esta metodología de diseño sumada a unos plazos de diseño y ejecución muy limitados, proporcionan soluciones estructurales poco eficientes y de gran coste, pero capaces de adaptarse a los cambios.

Por último, la politización de proyectos de gran importancia, como en este caso, puede tener como resultado modificaciones, paralizaciones o incluso cancelaciones del proyecto que pueden afectar gravemente al proceso de diseño conceptual de estructuras.

Agradecimientos

No gustaría dar las gracias a todos nuestros compañeros de la Sección de Estructuras Civiles por su colaboración en el diseño del proyecto.

Referencias

- [1] J.M. Vassallo, F. Di Ciommo, A. García-Castro, Intermodal exchange stations in the city of Madrid, *Transportation Research Record*, nº 39 (2012) 975-995.
- [2] R.Clever, Integrated timed transfer: A European perspective, *Transportation Research Record*, nº 1571 (1997) 109-115.
- [3] M. Caneva Rodríguez, J. Flórez Díaz, Criterios de localización de estaciones intermodales: propuesta para el Área Metropolitana de Caracas, *Revista Transporte y Territorio*, nº 19 (2018) 158-181.
- [4] M. Pitsiava, P. Iordanopoulos, Intermodal Passengers Terminals: Design Standards for Better Level of Service, *Transport Research Arena*. Volumen 48 (2012) 3297-3306.