

Estación de Santa Fe Tramo 3 Proyecto ejecutivo Tren interurbano México-Toluca (México)

Santa Fe Station Stretch 3 Construction project of Inter-City México-Toluca (México) Train

Carlos LLOPIS CAMPS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SENER
Ingeniero Responsable de Sección
carlos.llopis@sener.es

Pablo PEÑA RAMBLA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SENER
Ingeniero de Proyecto
pablo.pena@sener.es

Alfredo ARNEDO PENA

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SENER
CHIEF Technical Engineer
alfredo.arnedo@sener.es

RESUMEN

La nueva línea del Tren Interurbano Toluca-Valle de México cuenta con aproximadamente 60 km de longitud y es elevada prácticamente en toda su extensión. Esto hace que las estaciones se encuentren también por encima de la rasante del terreno y se conviertan en estructuras singulares. En el Tramo 3 se halla la estación de Santa Fe, un intercambiador modal que destaca por elevarse sobre ocho altas pilas centrales en forma de Y que sostienen el nivel de vía, y que son atravesadas por el nivel vestíbulo, por debajo del cual se encuentra una plataforma, también elevada, para el tráfico rodado que actúa de intercambiador entre el transporte ferroviario y el de carretera. La estructura se caracteriza por estar proyectada para resistir una acción sísmica elevada.

ABSTRACT

The new Inter-City Toluca-Valle de México train line, has a length of 60 km approximately and it is elevated in almost all its length. This makes the stations to be also above the grade line becoming singular structures. Along the Section 3 of the line it is placed Santa Fe station, a singular modal transport interchanger due to being elevated on eight central piers with a Y shape that support the track level, and that are crossed by the mezzanine level. Below this last one there is a platform, also elevated, for road traffic. The structure is characterised by being projected to withstand severe seismic stresses.

PALABRAS CLAVE: estación, estructura mixta, celosía metálica, sismo, BIM.

KEYWORDS: station, composite structure, trussed steel girder, seism, BIM.

1. Introducción

La nueva línea del Tren Interurbano Toluca-Valle de México, situada en el Estado de México, recorre aproximadamente 60 km entre las ciudades de Toluca y Ciudad de México, y es elevada en la práctica totalidad de su recorrido debido a las dificultades orográficas de su entorno y a que transcurre por una zona protegida ambientalmente. Esta particularidad hace que las estaciones se encuentren también por encima de la rasante del terreno y se conviertan en estructuras singulares.

En el Tramo 3 del recorrido, se emplazan dos de las seis estaciones previstas en la línea: Santa Fe y Observatorio. La estación de Santa Fe es un intercambiador modal entre tráfico ferroviario y tráfico rodado con características peculiares por encontrarse todos sus niveles elevados sobre el terreno, desde el nivel de vía hasta el de calle.

Santa Fe es una de las dos estaciones que se encuentran en Ciudad de México. La densidad de construcciones existentes en la zona dificultó la localización de una ubicación para la estación, encontrándose finalmente sobre una balsa natural de regulación; es decir, una zona que se prevé que sea inundable. De ahí la razón por la que resulta necesario que la estación sea elevada en todos sus niveles.

Otro hecho que hace que las estaciones sean singulares es la alta sismicidad de la zona. Además el país cuenta con la peculiaridad de que existen diversas normas sísmicas, con diferencias entre ellas, que pueden ser de aplicación.

Cabe destacar que la estación ha sido desarrollada mediante modelado de información de construcción, más conocido como tecnología BIM, lo cual ha permitido coordinar las principales disciplinas implicadas en ella: estructura, arquitectura e instalaciones.

2. Consideraciones sísmicas en el diseño

Para determinar las acciones sísmicas a considerar en el proyecto, se estudiaron las indicaciones de las "Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo" (NTCS-04) y el "Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo" de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), adoptándose las acciones correspondientes a la envolvente pésima de las dos normativas que producen unos esfuerzos y deformaciones mayores en las estructuras. Mientras que la norma de la CFE fue desarrollada para su aplicación en todo el territorio mejicano, la NTCS-04 es un conjunto de normas exclusivas de la Ciudad de México cuya aplicabilidad se estudia en este caso por situarse dos de las estaciones en la periferia de la ciudad.

Como variables características del cálculo de la acción sísmica se deben destacar el factor de reducción Q' , dependiente del factor de comportamiento sísmico de la estructura (Q) cuyo valor varía entre 1 y 4, y el factor de reducción por sobrerresistencia (R), que puede encontrarse entre 1 y 3. Ambos son coeficientes característicos de la estructura en cuestión y dependen de su ductilidad y período natural de vibración. Dividiendo por estos coeficientes se reduce el espectro sísmico de diseño.

Mientras que la NTCS-04 estipula espectros de diseño sísmico en los cuales ya se ha considerado de manera implícita el efecto de la sobrerresistencia existente en estructuras (R), la CFE emplea el factor R de manera explícita, teniendo que ser éste calculado para poder comparar los espectros que se obtienen por ambos reglamentos. De modo que se hallan los espectros por ambos procedimientos para las seis estaciones de la línea y el factor de sobrerresistencia por el que se

multiplicará el espectro obtenido por medio de la NTCS-04. Así, se obtiene la gráfica mostrada en la *Figura 1*.

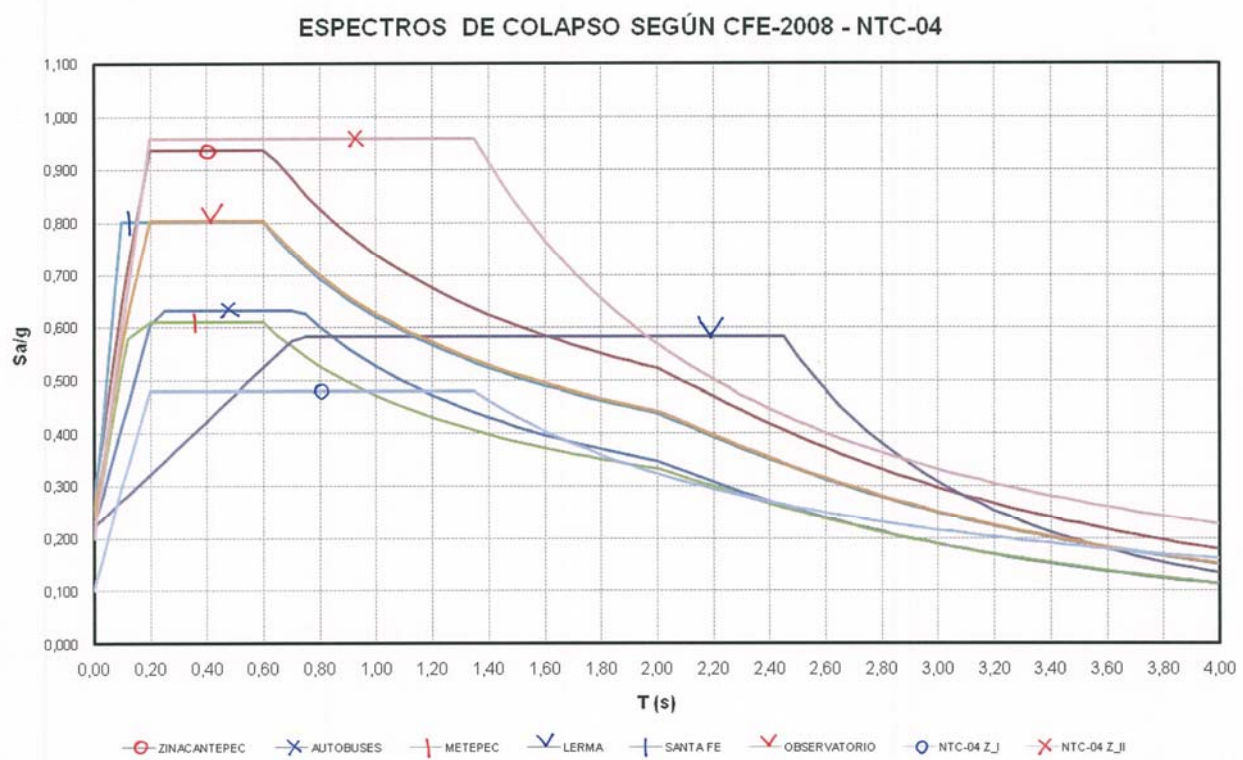


Figura 1. Espectros de diseño sísmico para todas las estaciones según NTCS-04 y CFE.

Como se puede apreciar en el gráfico, por medio de la NTCS-04 se obtienen únicamente dos espectros cuya aplicación depende de la zona dentro de la cual se encuentre la estructura, mientras que con la CFE se obtiene un espectro para cada ubicación. El espectro obtenido mediante la aplicación de la NTCS-04 para la zona II es el que presenta una respuesta mayor, aunque parecida al espectro obtenido para la estación de Zinacantepec aplicando la normativa de la CFE. La estación de Santa Fe se localiza en la zona I definida en la NTCS-04, correspondiente a la periferia de Ciudad de México. Dado que en el caso concreto de esta estación el espectro obtenido por medio de la CFE ofrece una menor respuesta que el espectro de la NTCS-04 para zona I, se emplea este último quedando del lado de la seguridad.

Siendo el espectro de la NTCS-04 el elegido para esta estación, resulta necesario determinar el coeficiente Q propio de cada estructura a calcular. Cabe destacar que para el cálculo de las máximas fuerzas en las pilas de la estación, elementos principales de la estructura, se emplea para la determinación de la acción sísmica un factor de ductilidad global $Q=1$, quedando del lado de la seguridad en lo que a esta acción se refiere pese a que la norma permite utilizar como mínimo $Q=2$. Por otro lado, se emplea $Q=2$ cuando el esquema estático es simplemente apoyado y la subestructura se comporta como columnas tipo ménsula, y $Q=3$ cuando el esquema estático en el sentido longitudinal es un marco dúctil de hormigón armado, resultado de la unión del tablero y la subestructura.

3. Descripción de la estación

En la estación de Santa Fe se distinguen tres niveles. El nivel inferior es el nivel intercambiador, situado a una altura aproximada sobre el terreno de 13 m, necesaria por preverse que la zona sea

inundable. En él se encuentra la conexión de la estación con el tráfico rodado, albergando los viales para vehículos de servicio público y privado. Bajo este nivel, se halla en uno de los extremos de la estación los locales técnicos necesarios para dar servicio a la estación. A una altura de 10.50 m sobre el nivel intercambiador se encuentra el nivel vestíbulo. En este nivel se disponen los tornos de acceso para los usuarios y el resto de locales técnicos. Finalmente, situados a una altura de 6.95 y 8.05 m sobre el nivel vestíbulo, se localizan el nivel de vía y los andenes, respectivamente. Los diferentes niveles pueden observarse en la sección transversal de la *Figura 2*.

La comunicación entre los diferentes niveles se lleva a cabo mediante escaleras fijas y mecánicas y ascensores. Los elementos de comunicación se han dispuesto "externamente" al cuerpo de la estación, esto es por fuera del plano de fachada. La conexión entre los niveles es tal que permite la independencia en el comportamiento estructural de las estructuras que los forman frente a las acciones gravitatorias y de sismo.

Adicionalmente, se proyectan los viaductos de acceso al nivel intercambiador para vehículos rodados, las rampas de acceso al nivel intercambiador desde las zonas peatonales adyacentes y las pasarelas de acceso al nivel vestíbulo, así como los edificios auxiliares para estos accesos.

A continuación se describen las características y singularidades de cada una de las estructuras que materializan los tres niveles mencionados, haciendo mención del modelo de cálculo empleado cuando por sus características sea destacable.

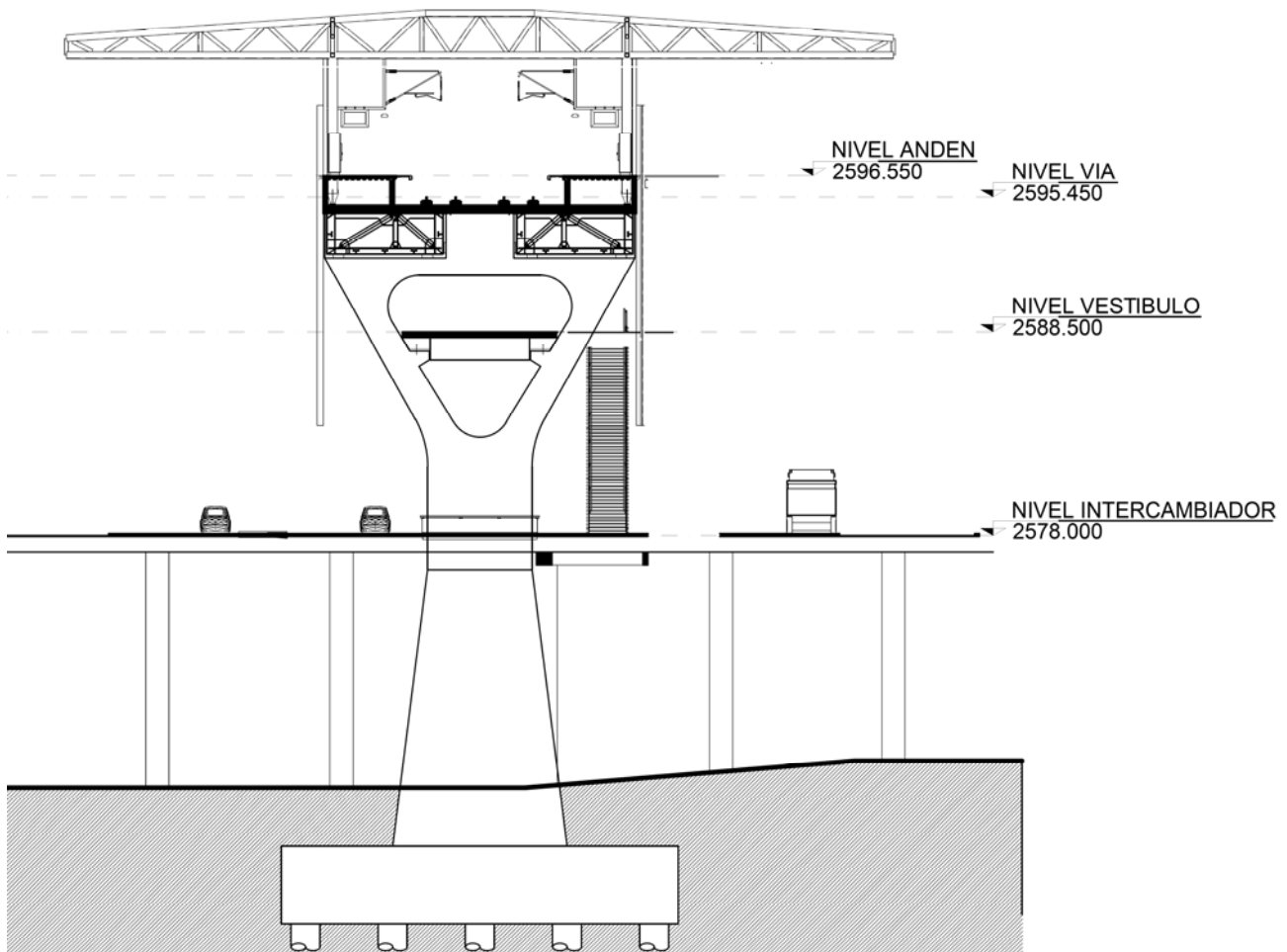


Figura 2. Sección transversal tipo en zona de pilas.

3.1. Niveles de vía y andén

El nivel de vía y el nivel andén se encuentran sobre la estructura principal de la estación, consistente en una fila de ocho grandes pilas aisladas en forma de Y separadas 28.50 m entre sí en dirección longitudinal que funcionan a modo de péndulo invertido frente a sismo en ambas direcciones principales. Sobre las pilas se dispone, simplemente apoyado, un tablero metálico formado por dos vigas cajón mixtas de 2.10 m de canto y 200 m de longitud, dividido en tramos isostáticos entre columnas de 25.00 m de luz, sobre el que descansa el nivel de vía y los dos andenes laterales. Los andenes tienen un ancho mínimo de 3.80 m y consisten en un forjado mixto de chapa colaborante apoyado en dos muros longitudinales cada uno. Sobre el tablero se sitúan los pilares mixtos de acero y hormigón que sirven de apoyo a la cubierta, compuesta de celosías metálicas en las dos direcciones principales, la cual cuenta con voladizos laterales de 13.50 m de longitud. Y por último, existe una vinculación con el nivel vestíbulo, a través de los elementos de fachada que actúan como tirantes frente a las cargas verticales del nivel vestíbulo y como elementos de sujeción frente a las acciones horizontales de la fachada.

3.1.1. Pilas

La estación cuenta con ocho pilas mixtas de una altura de 30 m cada una, empotradas en encepados de 20 pilotes de 1.50 m de diámetro y 40 m de longitud. La mitad inferior de las pilas, hasta unos 12 m de altura sobre el encepado, es de hormigón armado y tiene una sección rectangular de ancho variable con la altura. La parte superior de las mismas cuenta con una sección mixta de acero rellena de hormigón en masa y presenta la forma que se muestra en la *Figura 3*.

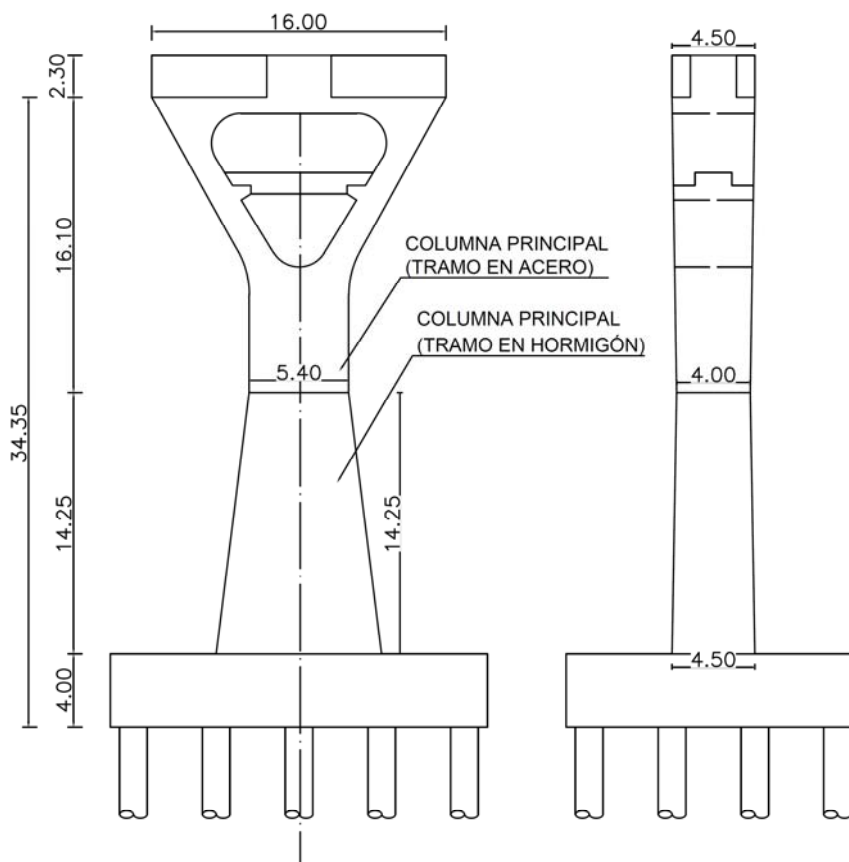


Figura 3. Alzado y perfil de las pilas.

La forma que se le otorga a la parte superior de las pilas viene dada por el modo de conexión de las pilas con los tableros, tanto de los niveles de vía y andenes como del nivel vestíbulo. En el primer caso, el tablero, cuyas características se explican en el siguiente apartado, se encuentra biapoyado sobre las ménsulas ejecutadas en la parte superior de las pilas. Para la realización del nivel vestíbulo se dispone el tablero biapoyado en las ménsulas realizadas en la cavidad de las pilas que permiten el tránsito de usuarios a lo largo de todo el vestíbulo.

La vinculación entre el tablero del nivel vía y las pilas es el resultado de un estudio en el que se analizan tres tipos de vinculación: una solución empotrada; una solución apoyada sobre apoyos convencionales y con topes sísmicos, y una solución sobre aisladores de núcleo de plomo. Se analizan los movimientos previstos y la influencia de la retracción y las variaciones térmicas. Finalmente, se deduce que el efecto del empotramiento es pequeño y realizarlo complicaría bastante la ejecución del nudo tablero-pila. También se observa que el empleo de los apoyos con núcleo de plomo reduce los esfuerzos con movimientos razonables del tablero pero origina mayores movimientos relativos entre plantas y además implica disponer elementos “singulares” en la estación. Por ello se considera que la mejor opción es la solución sin empotrar sobre apoyos convencionales con vanos isostáticos de tablero y utilizando topes sísmicos longitudinales y transversales en las pilas. Esta disposición ofrece la ventaja de independizar la construcción de elementos en obra y agilizar su construcción y la reducción de costes.

Para el diseño de las pilas se elaboran dos modelos de cálculo: un modelo de elementos finitos con elementos tipo *shell* para estudiar el comportamiento de la estructura a nivel local, y un modelo simplificado de elementos tipo barra para el análisis del comportamiento global de la estructura, de la interacción del acero con el hormigón, etc. Se muestra una imagen tridimensional de ambos modelos en la *Figura 4*.

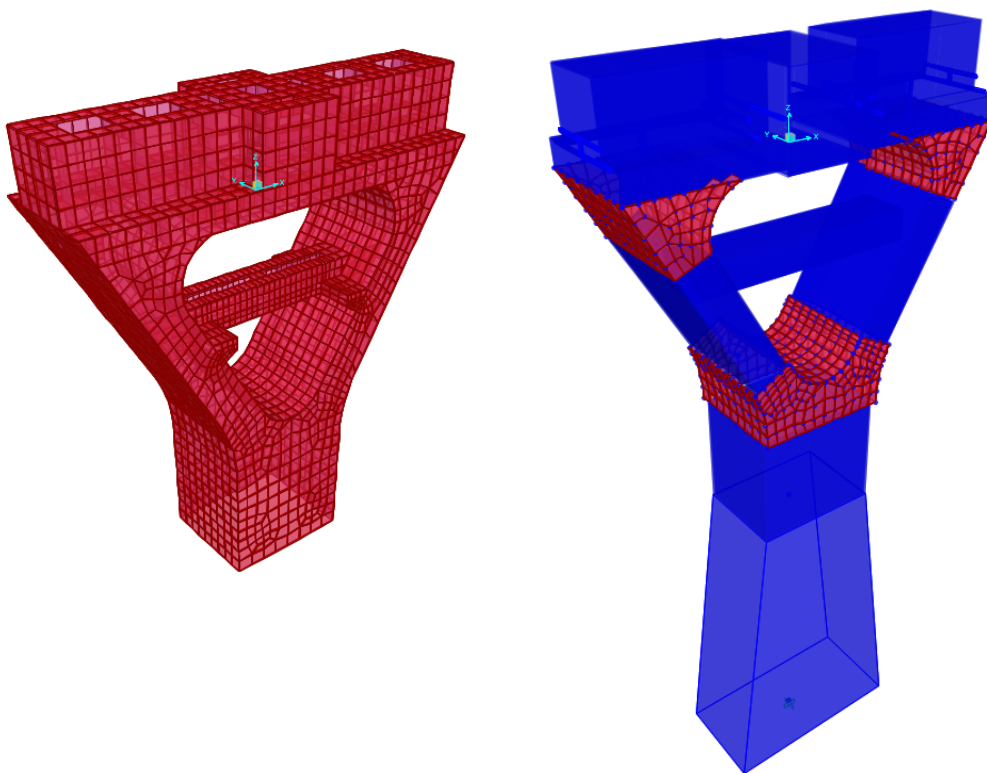


Figura 4. Modelos de las pilas: a) Modelo con elementos shell; b) Modelo de barras.

3.1.2. Tablero

El tablero que da lugar al nivel de vía y andenes está formado por dos cajones metálicos de 2.10 m de canto unidos transversalmente mediante riostras de acero estructural situadas cada 4.75 m. Cada uno de los cajones se dispone longitudinalmente biapoyado en dos puntos sobre el dintel de las pilas (véase la *Figura 5*). Además, en las zonas donde el andén debe ser ensanchado para conectarlo con las escaleras de acceso al mismo, resulta necesario ejecutar un voladizo al tablero tal y como se observa en la *Figura 6*. Tanto los perfiles que se utilizan para materializar el voladizo como la rigidización transversal entre los cajones se colocan cada 4.75 m haciéndolos coincidir con los puntos de apoyo de las escaleras.

Sobre el tablero se ejecuta una losa de hormigón armado de 40 cm de espesor unida a los cajones mediante conectadores que actúa como cabeza de compresión de la sección mixta.

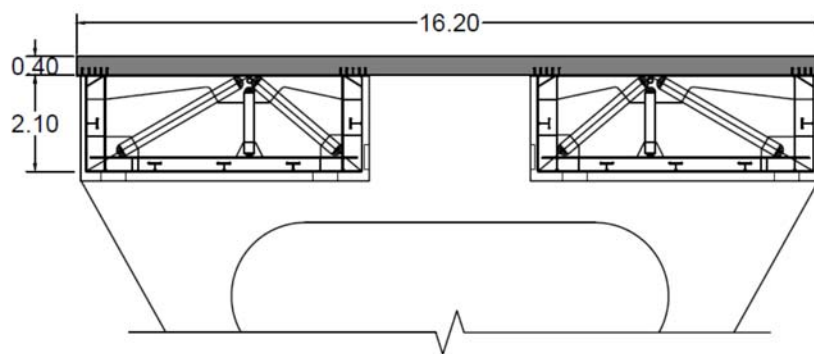


Figura 5. Sección transversal sobre pilas.

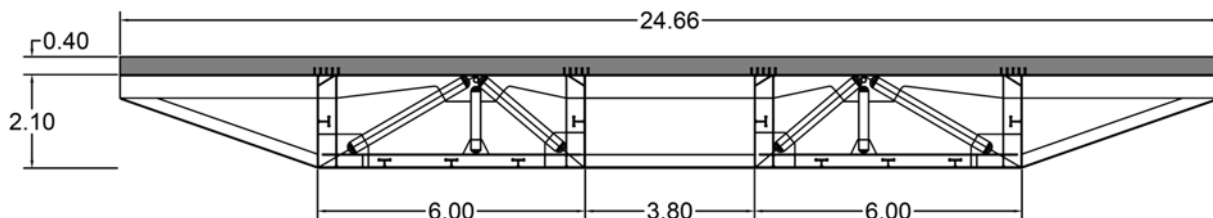


Figura 6. Sección transversal entre pilas en zona de conexión con escaleras.

Se tiene en cuenta a nivel estructural que las vigas transversales no presenten un elevado grado de empotramiento en el diafragma para evitar solicitaciones a torsión elevadas en los cajones longitudinales.

3.1.3. Cubierta

Otro elemento destacable del proyecto es la estructura que sustenta la cubierta. Consiste en una serie de celosías metálicas de canto variable que, unidas a dos pilares mixtos de acero y hormigón distanciados 15.20 m entre sí, conforman los pórticos transversales de la estructura. Estos últimos se separan cada 28.50 m coincidiendo con las pilas y se unen longitudinalmente mediante ocho celosías metálicas de canto constante distanciadas entre sí aproximadamente 6 m. Cabe destacar la vinculación articulada de los pilares al tablero y la existencia de voladizos laterales de 13.50 m de longitud a lo largo de los 214 m de estructura. Se disponen asimismo cruces de San Andrés para el arriostramiento frente a cargas horizontales entre los pórticos extremos y entre algunas de las alineaciones longitudinales. En la *Figura 2* se observa un pórtico transversal tipo.

3.1.4. Andenes

La estación de Santa Fe cuenta con dos andenes de 3.80 m de ancho que son ampliados hasta 8 m en aquellas secciones en las que existe un encuentro con las escaleras de acceso al andén. Consisten en un forjado mixto de chapa colaborante de 20 cm de espesor apoyado sobre muros de hormigón longitudinales que lo elevan sobre el nivel de vía.

3.2. Nivel vestíbulo

El nivel vestíbulo atraviesa las pilas de la estación originando un espacio de tránsito para los usuarios en el que se encuentran los tornos de acceso a la estación y algunos locales técnicos, tal y como se observa en la *Figura 7*, donde se representan los espacios abiertos del vestíbulo, las diferentes escaleras de acceso al nivel superior de andén y al nivel inferior (el nivel intercambiador) y los locales técnicos.

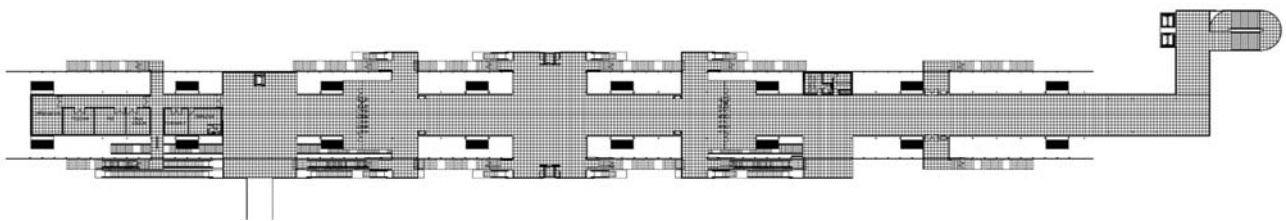


Figura 7. Vista en planta del nivel vestíbulo.

La estructura del nivel vestíbulo está constituida por un tablero metálico dividido longitudinalmente en tramos biapoyados en las pilas, el cual está arriostrado mediante tirantes sujetos al tablero superior dispuestos cada 2.38 m.

3.2.1. Tablero

Se trata de un cajón metálico de 1.20 m de canto en la zona central, que cuenta con 8 m de ancho en la zona de apoyo sobre las pilas y llega hasta 25 m de ancho en algunas secciones entre pilas. El ensanchamiento de la sección transversal se lleva a cabo mediante vigas metálicas de canto variable atirantadas cada 2.38 m en dirección longitudinal a la altura de la fachada de la estación. En la *Figura 8* se muestra la sección transversal de la estructura en una de las zonas entre pilas, así como los tirantes de fachada que sirven de apoyos.

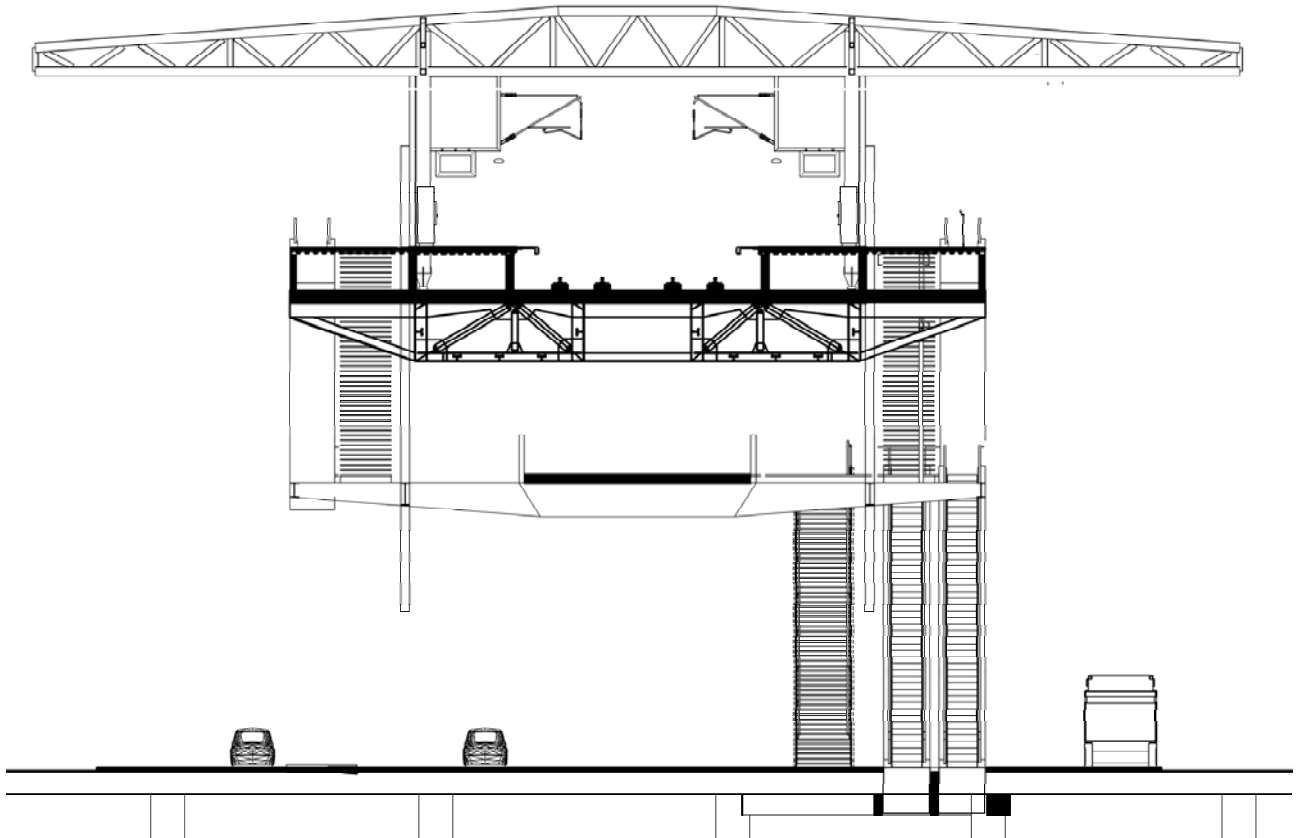


Figura 8. Sección transversal de la estación en zona entre pilas.

3.2.2. Tirantes de fachada

Los tirantes de fachada de los que cuelga el tablero del nivel vestíbulo se encuentran vinculados a los cajones del tablero del nivel superior. Los tirantes que reciben carga del nivel vestíbulo coinciden en posición con los diafragmas de dicho tablero, disponiendo así de un elemento con una rigidez y capacidad adecuada para recibir la carga puntual del tirante. Además forman, junto con una serie de perfiles transversales, un bastidor al que se fijan los elementos de fachada. Éste se observa en la *Figura 9*.

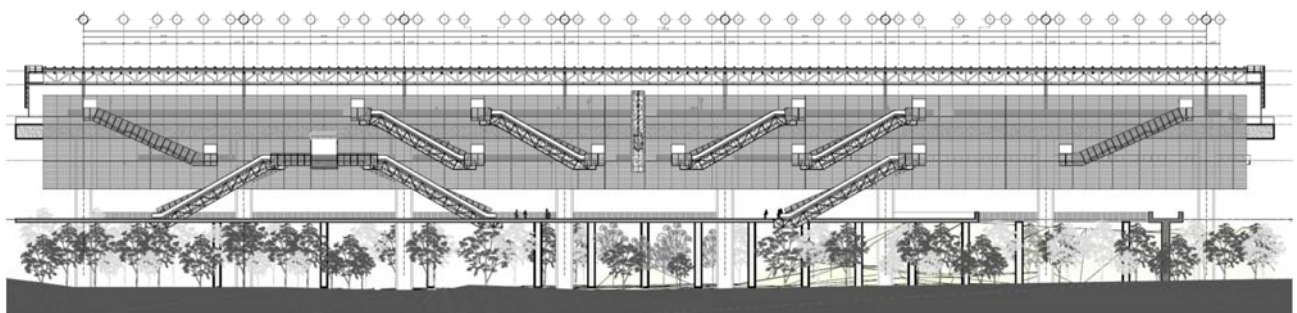


Figura 9. Alzado de la fachada de la estación.

3.3. Nivel intercambiador

El nivel intercambiador es un tablero de tipo losa de hormigón armado de 0.80 m de canto, empotrado sobre una serie de columnas circulares de 1.20 m de diámetro separadas en una cuadrícula de 9.50 m. Las columnas se empotran asimismo en sus encepados de cuatro pilotes, de manera que son capaces de resistir tanto los esfuerzos producidos por los movimientos reológicos

del tablero, con juntas tipo “Goujon CRET” transversales dispuestas cada 80.00 m, como las acciones derivadas del sismo horizontal.

La longitud total del tablero es de aproximadamente 250 m y el ancho es de 55 m. En los extremos las formas se adaptan a los viales de acceso del tráfico rodado y peatonal, tal y como se observa en la planta mostrada en la *Figura 10*.

Siete de las ocho pilas de la estación atraviesan la losa del intercambiador, por lo que se prevén unos huecos rectangulares que permitan independizar los movimientos reológicos, térmicos y sísmicos de ambas estructuras.

Inmediatamente a continuación de la rampa de acceso peatonal que se observa a la izquierda en la *Figura 10*, se dispone un cajón de hormigón armado bajo la losa del intercambiador, para albergar aquí los equipos necesarios de los locales técnicos. El acceso a la misma se hace desde superficie, puesto que se prevé que la zona sea inundable y el agua pueda llegar hasta el borde inferior de la losa.

A nivel estructural el tablero se comporta como una losa maciza de hormigón armado que se refuerza en las zonas de apoyo de las escaleras de subida al vestíbulo con unas vigas ejecutadas *in situ* de hormigón armado. Destaca la especial atención que se presta a los puntos de interfaz de este tablero con los viales, ya que tanto las columnas como sus cimentaciones reciben las cargas de estos viales además de las de la losa.



Figura 10. Planta del nivel intercambiador.