

Estaciones Tramo 1 Proyecto ejecutivo Tren interurbano México-Toluca (Méjico)

Stretch 1 Stations Construction project of Inter-City México-Toluca (Méjico) Train

Álvaro FERNANDEZ CELEMÍN

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SENER
Ingeniero Responsable de Sección
alvaro.fernandez@sener.es

Íñigo LÓPEZ DE VICUÑA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SENER
Ingeniero de Proyecto
inigo.lopez@sener.es

Mario MARTINS DA CRUZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SENER
Ingeniero de Proyecto
mario.martins@sener.es

Carlos LLOPIS CAMPS

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

José CIVERA ABAD

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SENER
Ingeniero de Proyecto
jose.civera@sener.es

RESUMEN

La nueva línea del Tren Interurbano Toluca-Valle de México cuenta con aproximadamente 60 km de longitud y es elevada en su práctica totalidad. Esto hace que las estaciones se encuentren también por encima de la rasante del terreno y se conviertan en estructuras singulares. En el Tramo 1 se hallan cuatro de las seis estaciones previstas en la línea, las cuales han sido proyectadas de manera análoga independizando la estructura principal de los edificios de acceso. De la estructura destaca el esbelto tablero de hormigón pretensado dividido en tramos y empotrado a las pilas que elevan la estación, y la celosía metálica de cubierta que se apoya sobre este tablero.

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 1 of the line, four of the six planned stations are placed, which have been projected similarly making the principal structure independent of the access buildings. About the principal structure, it can be highlighted the slender prestressed concrete deck divided in stretches and embedded to the piers that raise the station, and the trussed steel girder for the roof which is supported on the deck.

PALABRAS CLAVE: estaciones, pretensado, hormigón, celosía metálica, sismo.

KEYWORDS: stations, prestress, concrete, trussed steel girder, seism.

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.

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 en función del Estado donde se ubique la estructura.

En el Tramo 1 del recorrido, de aproximadamente 40 km, se emplazan cuatro de las seis estaciones previstas en la línea: Zinacantepec, Terminal de Autobuses, Metepec y Lerma. Todas ellas se han resuelto de manera análoga, adaptando la solución propuesta a las características de cada uno de los emplazamientos.

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 mexicano, la NTCS-04 es un conjunto de normas exclusivas de la Ciudad de México cuya aplicabilidad se estudia en este caso concreto por encontrarse las estaciones muy próximas a dicho territorio.

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*.

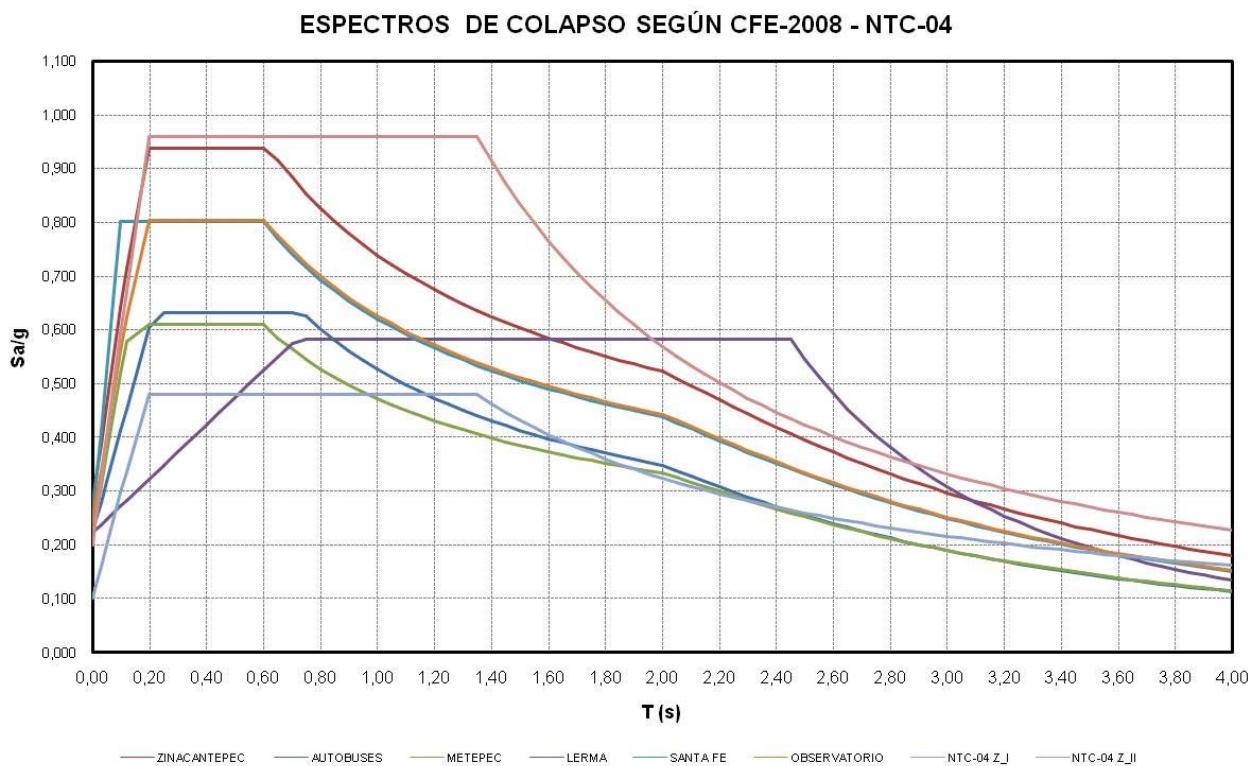


Figura 1. Espectros de diseño sísmico para todas las estaciones según NTCS-04 y CFE.

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. Debido a que la zonificación descrita en la NTCS-04 sólo recoge las ubicaciones dentro de Ciudad de México, se opta por considerar los espectros obtenidos con la normativa de la CFE para las estaciones que se encuentran dentro del Estado de México (Zinacantepec, Terminal de Autobuses, Metepec y Lerma), ya que los terrenos no son fácilmente asimilables a los considerados en las zonas I y II y además el cálculo de la CFE permite utilizar las columnas estratigráficas correspondientes a cada ubicación, obteniéndose de esta manera resultados más acordes a la morfología geológica de las ubicaciones.

Siendo el espectro de la CFE el elegido para las estaciones del Tramo 1, resulta necesario determinar los coeficientes Q y R propios de cada estructura a calcular. Cabe destacar que para el tablero y las pilas, elementos principales de la estructura de las estaciones, se emplean en base a la tipología y características de la estructura un factor de ductilidad global $Q=3$ y una sobrerresistencia $R=2$.

3. Descripción de las estaciones

Cada una de las cuatro estaciones está formada por dos estructuras independientes entre sí. Por un lado, la estructura principal de la estación, la cual sustenta el nivel de vía y los andenes. Por otro, los edificios de acceso a la estación, que albergan el vestíbulo y los locales técnicos. La independencia entre ambas estructuras ha permitido desarrollar la solución propuesta de una forma más rápida y eficiente al posibilitar el trabajo en paralelo de ambas.

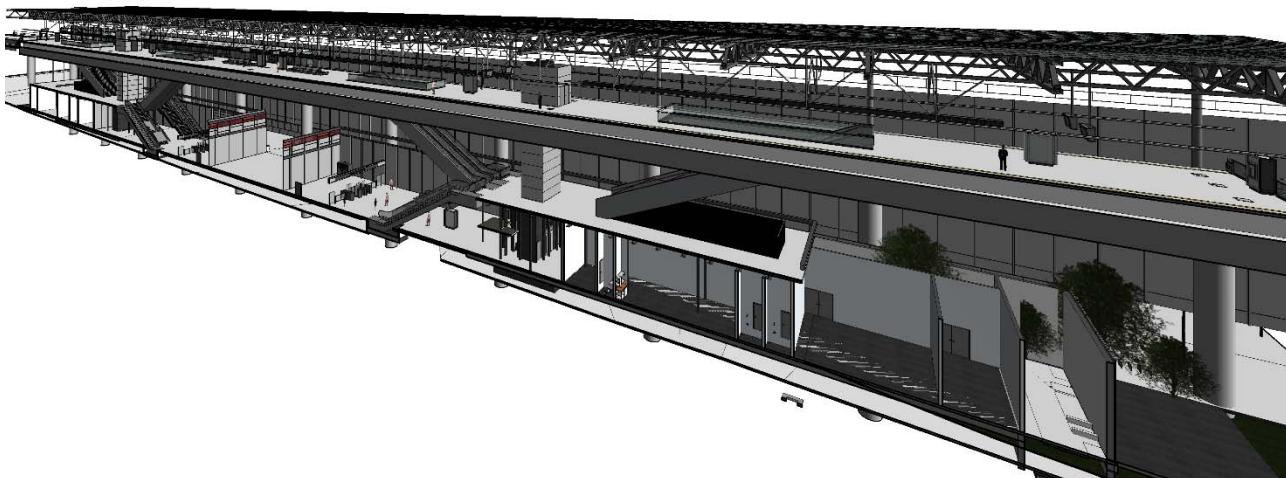


Figura 2. Vista tridimensional de la estación de Zinacantepec.

El conjunto de ambas estructuras conforma los tres niveles principales de las estaciones: nivel de calle, en el que se encuentran el vestíbulo, los locales técnicos y aparcamientos de servicio público y privado; nivel vestíbulo intermedio, y nivel andén. En la *Figura 2* se pueden observar los tres niveles mencionados.

La estructura principal y los edificios de acceso se comunican mediante escaleras fijas y mecánicas entre los distintos niveles y dos ascensores. La conexión entre los elementos intermedios y las estructuras principales es tal, que permite la independencia en el comportamiento estructural de cada una de ellas frente a las acciones gravitatorias y de sismo.

A continuación se describen las características y singularidades de ambas estructuras, desde un punto de vista estructural, haciendo mención del modelo de cálculo empleado cuando por sus características sea destacable.

3.1. Edificios de acceso

La parte inferior de la estación, correspondiente al nivel calle, contiene los vestíbulos de zona de pago y no pago, así como las llegadas de los ascensores y escaleras. Las edificaciones del nivel calle se encuentran constituidas por dos edificios de planta rectangular de 11.10x32.60 m situados simétricamente a ambos lados del centro de la estación, permitiendo el acceso a la zona oeste y este del andén central, respectivamente.

Los edificios se plantean a base de muros perimetrales de hormigón armado de 30 cm de espesor, apoyados en una losa de cimentación de hormigón armado de 60 cm de canto y con el techo constituido por un forjado mixto de chapa colaborante de 15 cm de canto, sobre vigas metálicas apoyadas en los muros perimetrales.

En la zona correspondiente al vestíbulo exterior existente entre los dos edificios, la envolvente se resuelve con un cerramiento ligero a base de mamparas y se dispone una solera de 20 cm de canto sobre el terreno, con un recresco de 20 cm, contando con el acabado de arquitectura, en el que se ahogan las conducciones necesarias para el paso de instalaciones.

Únicamente en el caso de la estación de Lerma, para la cimentación de los edificios se requiere una losa pilotada de 60 cm de canto, con pilotes de 1 m de diámetro dispuestos formando una cuadrícula de unos 10 m de lado.

3.2. Estructura principal

La estructura principal de las estaciones consiste en un tablero de tipo losa aligerada de hormigón pretensado de 1.80 m de canto solidario con columnas circulares de 1.80 m de diámetro, separadas 20 m en dirección longitudinal y 13.55 m en dirección transversal y cimentadas sobre encepados de 4 pilotes de longitudes variables entre 20 y 40 m. Sobre este tablero descansa el nivel de vía y el correspondiente al andén central, con una longitud total de estación de 200 m. El andén tiene una anchura de 10 m y consta de un forjado mixto de chapa colaborante apoyado en cuatro muros longitudinales. 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 un voladizo de 12 m en uno de sus lados.

3.2.1. Tablero y pilas

Uno de los elementos singulares de estas estaciones es el tablero de hormigón pretensado, de 1.80 m de canto, aligerado, con una longitud total de 200 m y con luces de 20 m. En la *Figura 3* puede observarse su sección transversal.

Desde el punto de vista estructural, el tablero se comporta como dos vigas continuas longitudinales de hormigón pretensado que se conectan transversalmente mediante una losa de hormigón armado que conforma la superficie del tablero sobre la cual se ejecuta el nivel de andén.

En las pilas de los extremos de las estaciones el apoyo es articulado, mediante neoprenos, ya que se aprovecha dicho apoyo para las vigas prefabricadas de los viaductos que acometen a la estación. En las pilas de apoyo intermedias el tablero está empotrado, uniéndose transversalmente mediante riestras en todas las alineaciones transversales de los pilares para asegurar el correcto funcionamiento ante sismo. La anulación de la ley de flectores ante cargas horizontales en el centro de estas riestras explica el reducido canto central que se les da.

Debido a la trasmisión de esfuerzos longitudinales de la vía al tablero, para cuya solución se requiere la disposición de juntas de movimiento, y las importantes pérdidas de pretensado que supondría el tesado de cables de 200 m, se disponen cuatro apoyos a media madera en el tablero (dos en el caso de Terminal de Autobuses). Así, la estructura del tablero se puede estudiar como cinco tramos independientes, de unos 40 m de longitud cada uno, que tendrán un comportamiento muy similar debido a que las condiciones de apoyos y luces son similares en los cinco tramos. La localización de estos apoyos a media madera se define en puntos donde la ley de flectores se anula. Esto permite que el comportamiento del tablero longitudinalmente siga siendo el de una viga continua. Se muestra en la *Figura 4* la ubicación de los apoyos a media madera, coincidente con las secciones de flector nulo que se observan en la *Figura 5*.

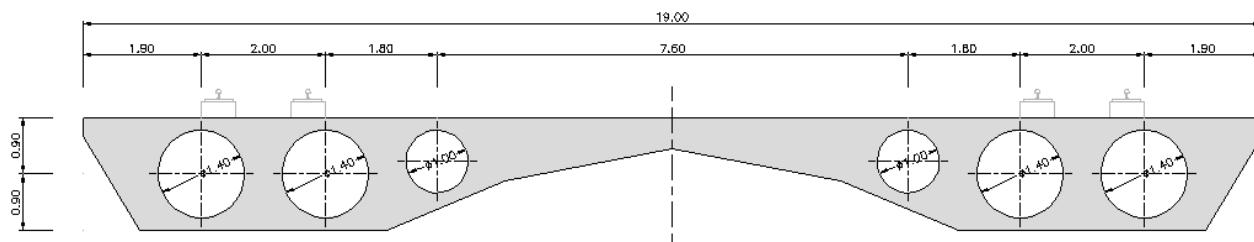


Figura 3. Geometría de la sección transversal del tablero.

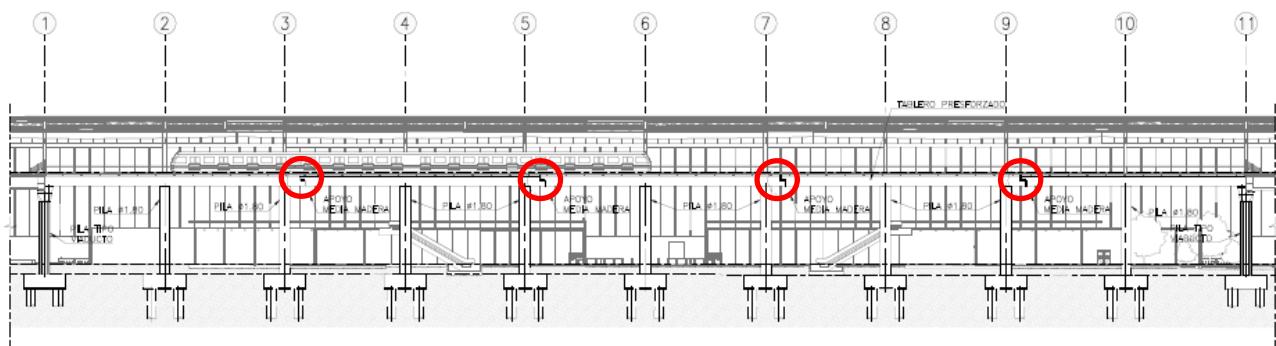


Figura 4. Sección longitudinal de la estación de Zinacantepec.

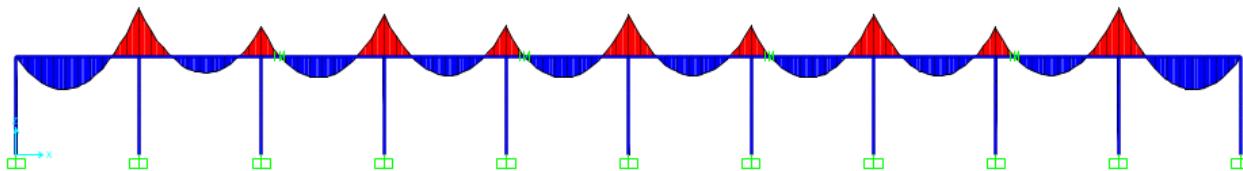


Figura 5. Ley de momentos flectores frente a cargas gravitatorias.

La división en tramos añade una restricción en el proceso constructivo, que es la imposibilidad de realizar la operación de retesado en uno de los extremos una vez construido el tramo contiguo, realizándose por tanto la operación de tesado únicamente por uno de los extremos. No es así en el caso de la estación Terminal de Autobuses, en la que el tablero cuenta únicamente con tres tramos en lugar de cinco y se decide construir en primer lugar el tramo central por ser el más largo para permitir realizar las operaciones de tesado y retesado.

Las pilas de apoyo del tablero son de hormigón armado de sección circular de 1.80 m de diámetro. Las pilas extremas son, sin embargo, de sección rectangular achaflanada y sirven de apoyo para la estación y el viaducto. Todas ellas tienen una altura media de 16 m para la estación de Zinacantepec, siendo ésta la más alta de las cuatro estaciones del Tramo 1.

El modelo de cálculo que se empleó contempla todas las particularidades mencionadas. Se trata de un modelo de elementos finitos tipo barra (véase la *Figura 6*), en el que destaca el tipo de unión transversal modelizado entre las dos vigas longitudinales para garantizar que son éstas las que trabajan a flexión transversal y torsión, consistente en elementos barra conectados de forma articulada -en cuanto al flector horizontal se refiere- a ambas vigas principales. También se introducen vinculaciones específicas en los apoyos a media madera que representan las condiciones de contorno de la unión -elementos tipo *LINK*- . Además, el modelo tiene en cuenta los huecos existentes en el tablero en los encuentros con escaleras y ascensores.

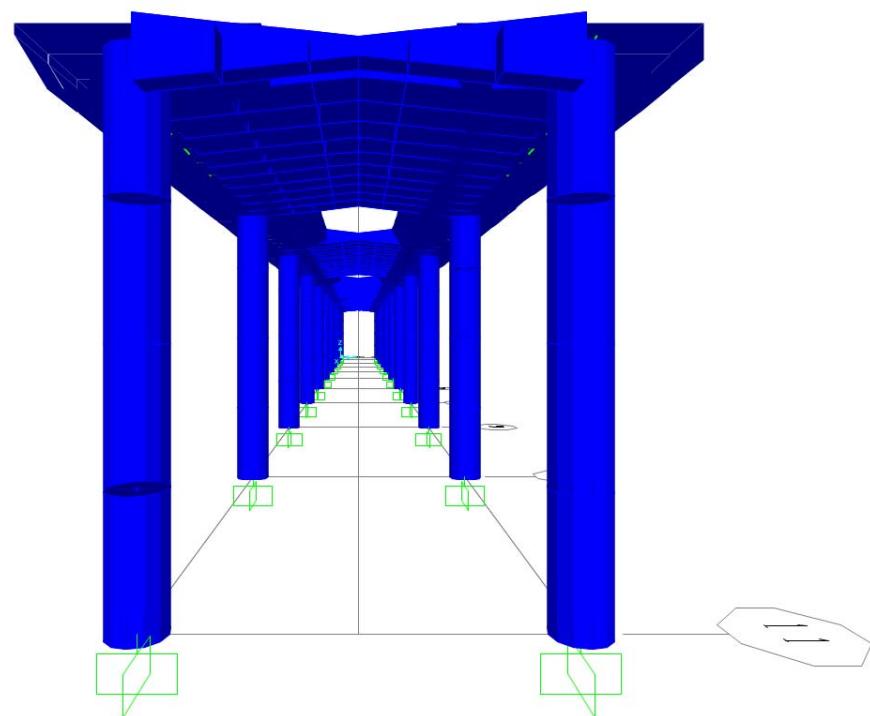


Figura 6. Vista frontal del modelo de barras extruido.

En cuanto a los cables de pretensado, cada viga principal cuenta con 8 tendones agrupados en dos grupos de 4, con una fuerza de tesado por tendón de 2930 kN, dispuestos siguiendo la configuración mostrada en las *Figuras 7 y 8*. El trazado de los cables varía en alzado y en planta para adaptarse a la ley de esfuerzos flectores en alzado y a las condiciones de aligeramiento y distancia entre placas de anclaje en planta. En la *Figura 9* puede apreciarse el trazado en alzado de cables modelizado sobre apoyos.

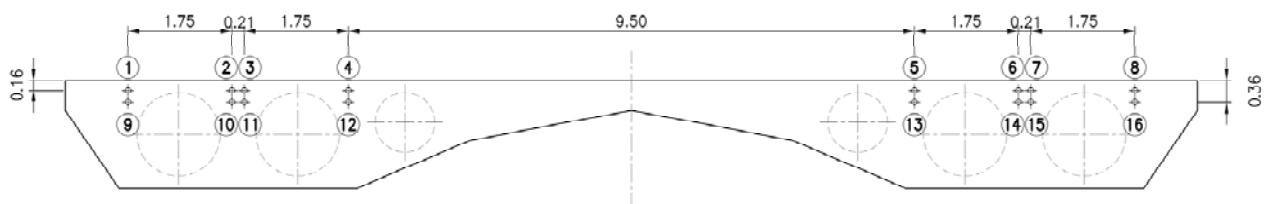


Figura 7. Posición de torones en sección de apoyo en pilares (posición más alta).

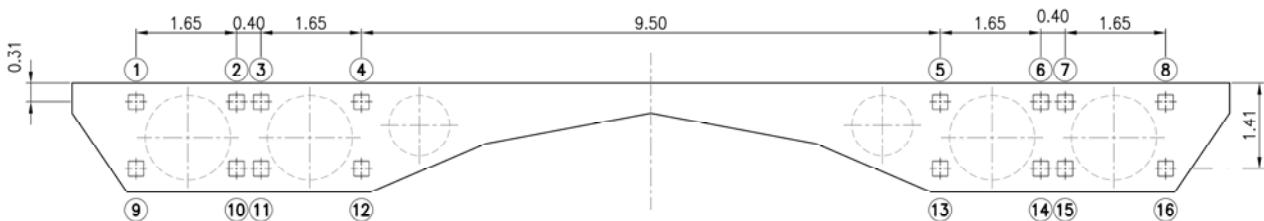


Figura 8. Posición de torones en el inicio de un tramo de tablero.

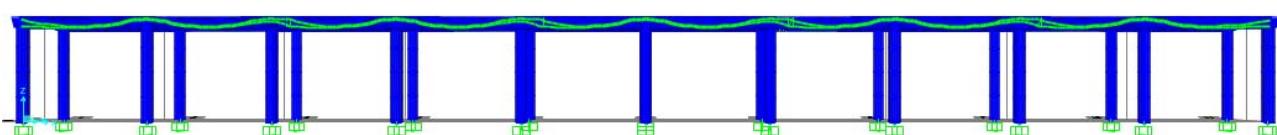


Figura 9. Modelización del trazado de los cables de pretensado.

En la *Figura 10* se observan ya construidos el tablero y las pilas de la estación de Zinacantepec.



Figura 10. Tablero y pilas de la estación de Zinacantepec en fase de obra.

3.2.2. Andenes

Las estaciones constan de un único andén central de 10 m de ancho y 200 m de longitud. La estructura consiste en un forjado mixto de chapa colaborante de 15 cm de canto, apoyado en cuatro muros longitudinales de 20 cm de espesor que arrancan del tablero que soporta el nivel de vía y el andén, tal y como se observa en la *Figura 11*. El forjado presenta los huecos necesarios para la llegada de las escaleras fijas, mecánicas y elevadores.

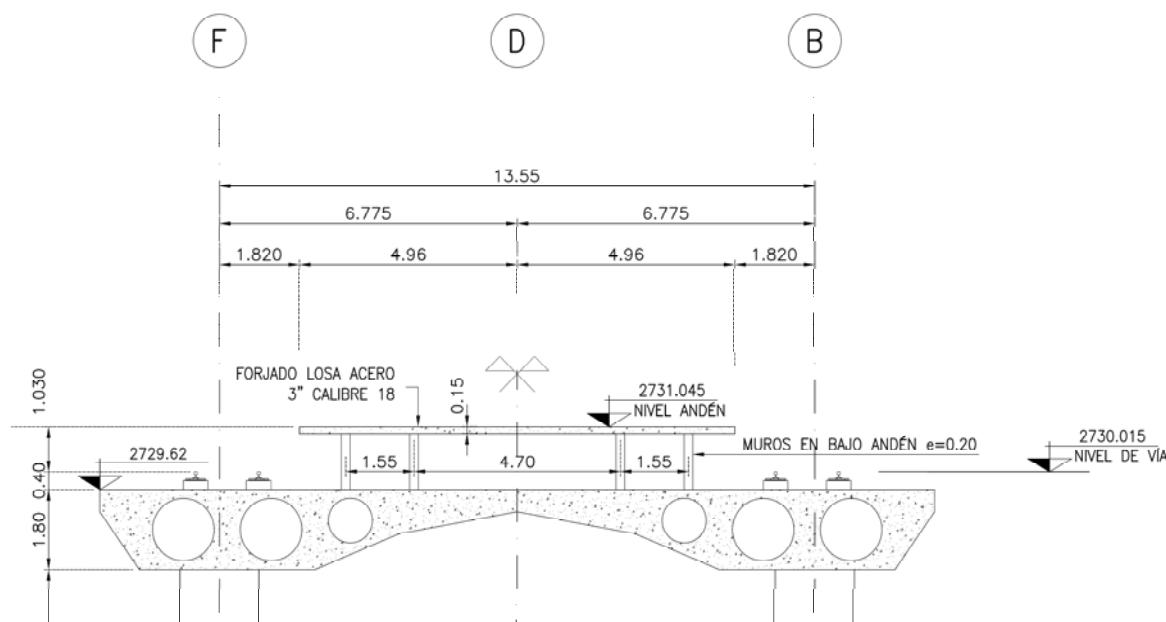


Figura 11. Sección transversal del andén central.

3.2.3. Cimentación de la estructura principal

Como solución para la cimentación de las pilas se define una cimentación profunda compuesta por un encepado de hormigón armado de dimensiones 7.00x7.00x2.30 m del que parten cuatro pilotes de hormigón armado de 1.50 m de diámetro y ejecutados *in situ*. La longitud de los pilotes varía entre 20 y 40 m en función de si soportan las pilas de los extremos de la estación o las interiores y de la estación en la que se sitúen de entre las cuatro del Tramo 1.

3.2.4. 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 19 m entre sí, conforman los pórticos transversales de la estructura. Estos últimos se separan cada 20 m coincidiendo con las pilas y se unen longitudinalmente mediante siete 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 un voladizo de 12 m de longitud a lo largo de los 220 m de estructura. Se disponen asimismo cruces de San Andrés para el arriostramiento frente a cargas horizontales en el plano de la cubierta entre los pórticos extremos y longitudinalmente entre los ejes B y C, y F y G (véase la *Figura 13*). En la *Figura 12* se muestra una vista tridimensional de la estructura principal de sustentación de la cubierta. En la *Figura 14* se observa un pórtico transversal tipo.

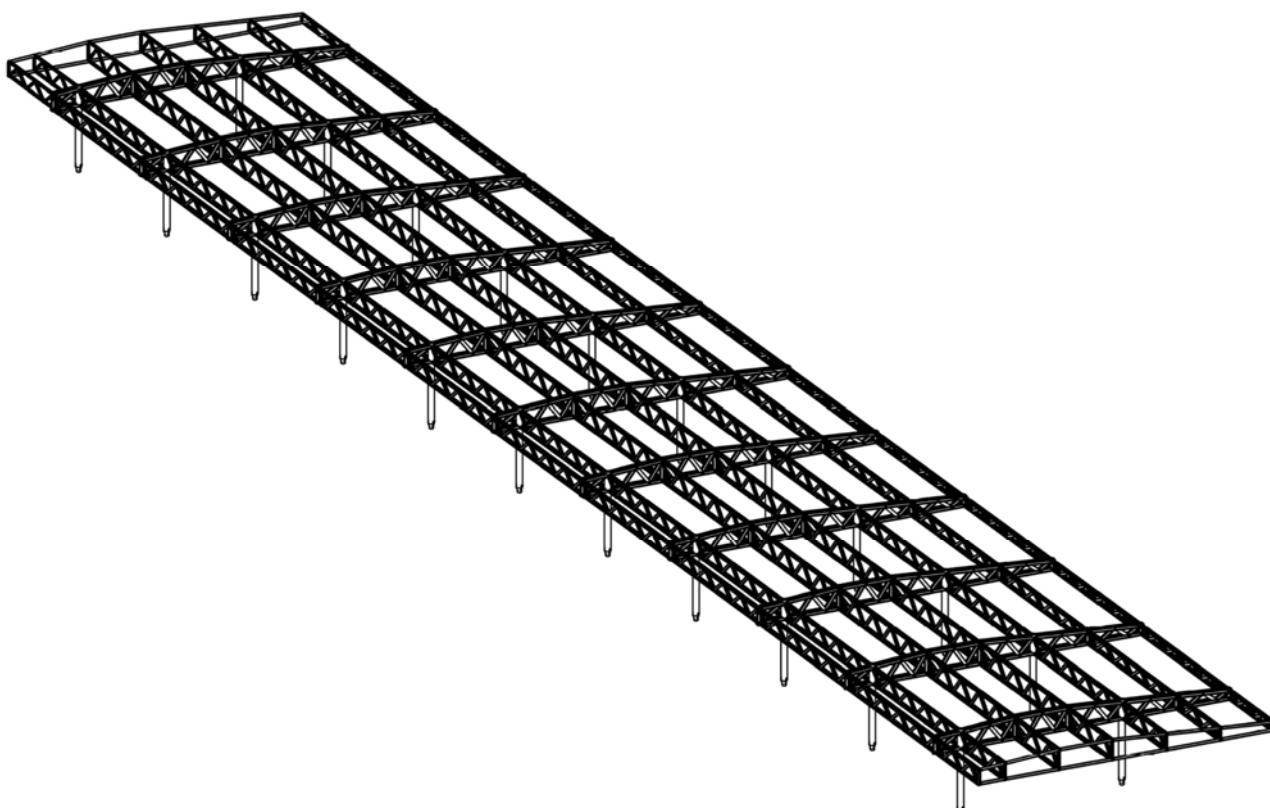


Figura 12. Vista tridimensional de la estructura de cubierta.

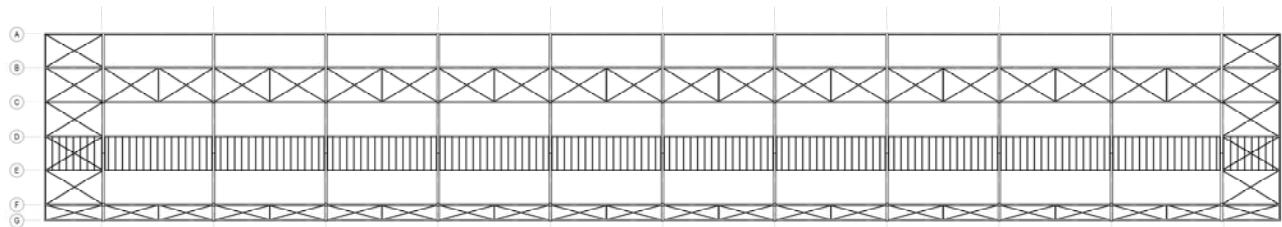


Figura 13. Vista en planta de la cubierta.

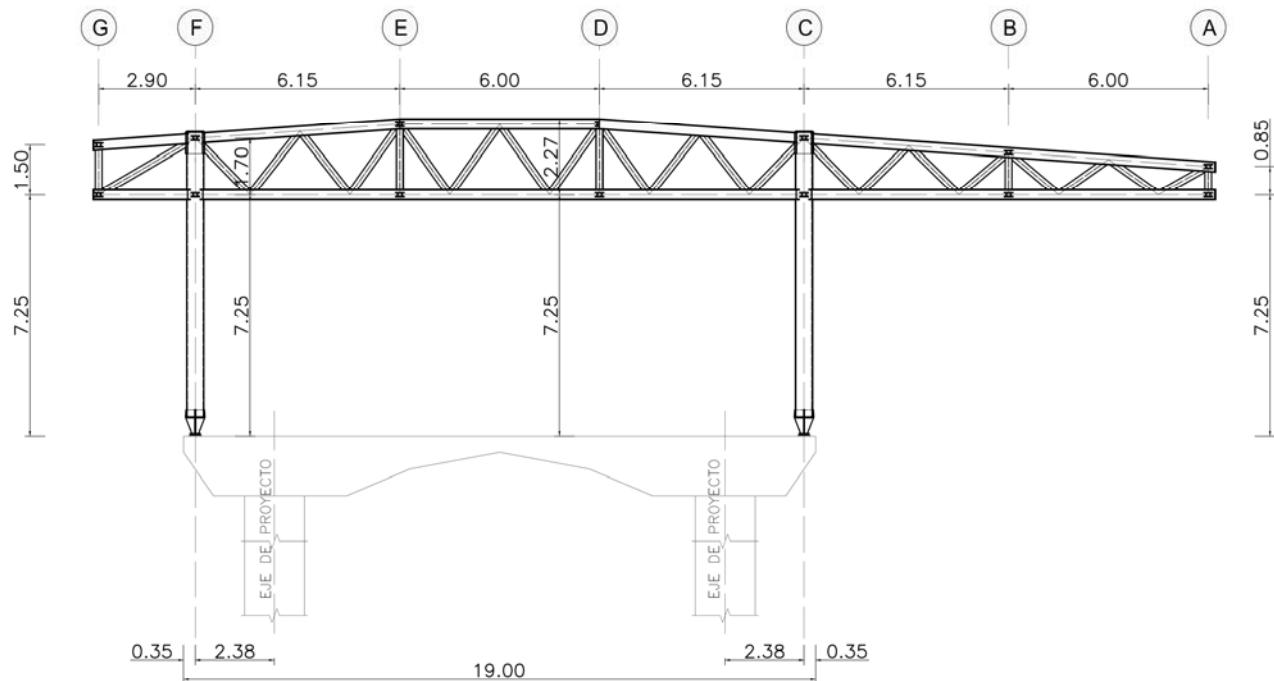


Figura 14. Pórtico transversal tipo de la estructura de cubierta.