

Las 6 Terminales de la Ampliación del Ferrocarril Suburbano. Ruta Lechería-AIFA en México

The 6 Terminals of the Suburban Railway Expansion. Lechería-AIFA Route in Mexico

Ignacio Gandía Pérez^a, Alexander Domínguez Marquina^b, María Gómez Irigaray^c,
Ángel Paradas Lara^d, Claudio Ascunce López^e, Antonio José Madrid Ramos^f

^aIngeniero Civil. Máster en Estructuras, Cimentaciones y Materiales. PROES. Jefe de Proyecto. ignacio.gandia@proes.es

^bIngeniero Civil. PROES. Jefe de Proyecto. alexander.dominguez@proes.es

^cIngeniera Naval. PROES. Directora de Proyectos. maria.gomez@proes.es

^dMáster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. PROES. Jefe de Proyecto. angel.paradas@proes.es

^eMáster Ingeniero Civil. PROES. Jefe de Proyecto. claudio.ascunce@proes.es

^fMáster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. PROES. Director Técnico. antonio.madrid@proes.es

RESUMEN

Proes ha proyectado las estructuras de seis estaciones de ferrocarril en México. Se trata de edificios de más de 200 m de longitud. El esquema estructural consiste en una losa apoyada sobre el terreno, con andén central y vías laterales. En los extremos de la losa se disponen muretes de hormigón que soportan pilares metálicos. Al andén central se accede desde un vestíbulo elevado, que apoya en los pilares metálicos laterales y en los situados en el propio andén. La losa del vestíbulo se resuelve con un emparrillado metálico que sustenta un forjado mixto de chapa colaborante. La cubierta se realiza mediante un arcotecho. El emplazamiento presenta una alta sismicidad, que ha condicionado el diseño y los detalles.

ABSTRACT

Proes has designed the structures for six railway stations in Mexico. These are buildings over 200 m long. The structural scheme consists of a slab resting on the ground, with a central platform and side tracks. At the ends of the slab there are concrete walls that support steel columns. The central platform is accessed from an elevated hall, which is supported by the side steel columns and those located on the platform itself. The hall slab is made up of a steel grid that supports a composite steel slab. The roof is made with an arched roof. The site has a high seismic activity, which has conditioned the design and the detailing.

PALABRAS CLAVE: estaciones de tren, cálculo sísmico, normativa mexicana, estructura metálica.

KEYWORDS: railway stations, seismic analysis, Mexican codes, steel structure.

1. Introducción

La línea de ferrocarril suburbano que comunica Lechería con el Aeropuerto Internacional Felipe Alonso (AIFA) cuenta con seis estaciones. Cada

una de ellas forma parte de un CETRAM (Centro de Transferencia Modal) en el que se integran las pasarelas de acceso al vestíbulo, la

subestación eléctrica y diversas construcciones menores. Proes ha desarrollado la arquitectura, el diseño estructural y las instalaciones de todas las terminales, aplicando la normativa mexicana [1-7]. El proyecto se ha desarrollado con metodología BIM.

Las seis estaciones ordenadas en el sentido Lechería-AIFA son las siguientes:

- Estación 1 Cuyamil
- Estación 2 Los Ágaves
- Estación 3 Teyahualco
- Estación 4 Prados Sur
- Estación 5 Nextlalpan
- Estación 6 Jaltocán

Las estaciones 1 a 5 tienen la misma geometría, con andén de 8 m de anchura. La estación de Jaltocán, la más cercana al aeropuerto, tiene un andén de 12 m.

Actualmente, las seis terminales se encuentran en construcción, con distinto grado de avance, siendo superior en las estaciones más próximas al aeropuerto. En la Figura 1 se muestra una vista general de una de las estaciones.

2. Descripción de las actuaciones

Las estaciones se implantan sobre las vías existentes. El acceso a cada estación se realiza mediante una pasarela elevada que conecta con un Centro de Transferencia Modal (Cetram). Anexo al Cetram se encuentra un estacionamiento para vehículos privados, motocicletas y bicicletas.

El estilo adoptado en el diseño de las estaciones es semejante a las estaciones ya construidas del suburbano, tanto en su distribución arquitectónica como en los materiales. Con ello se pretende mantener la identidad del suburbano para los viajeros, manteniendo el mismo esquema funcional.

Desde el andén central inferior se sube al vestíbulo superior mediante seis escaleras dispuestas de la misma forma en todas las estaciones. En el vestíbulo se mantiene la misma distribución, con similar ubicación para las taquillas y las dependencias para los trabajadores.



Figura 1. Vista general de una infografía de la Estación 6 Jaltocán. En la esquina superior derecha se muestra el avance de las obras en el tercer trimestre de 2024.

Se trata de edificios muy alargados con cubierta metálica. Los suelos son de mármol, la estructura metálica está pintada en rojo. Las fachadas están abiertas, constituyendo un espacio interior muy luminoso y ventilado. Están parcialmente cerradas mediante láminas perforadas, para ofrecer una cierta protección frente al sol y la lluvia. Las novedades introducidas en los diseños han sido las siguientes:

- Se ha dispuesto una cubierta de arcoteco, que no requiere una estructura metálica de soporte, ofreciendo una imagen más limpia y acogedora.

- Se cambia la iluminación de fluorescentes por iluminación LED, con un menor consumo eléctrico y un mayor rendimiento y vida útil.

- Se simplifican los elementos de señalización a nivel del andén, de modo que resulten más sencillos de limpiar.

- Las fachadas se realizan mediante una chapa perforada prepintada, lo cual reducirá el mantenimiento necesario.

3. Edificio de la estación

El edificio de la estación de Jaltocán tiene unas dimensiones de 213,50 m de largo por 20,00 m de ancho. Las otras cinco estaciones son análogas, con 4 m menos de ancho.

Las vías se separan aproximadamente 15 m entre ejes, de modo que el acceso a los trenes por parte de los viajeros se produzca mediante un andén central compartido para ambos sentidos. Este andén tiene una longitud de 210 m y un ancho de 12 m (Figura 2)

El nivel del andén está comunicado con el nivel superior del vestíbulo, mediante seis escaleras de 4 metros de ancho y un ascensor panorámico.

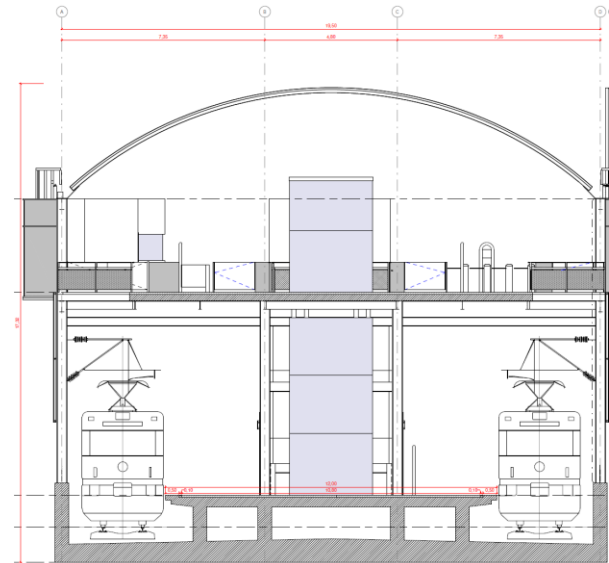


Figura 2. Sección tipo de la estación de Jaltocán.

Este nivel del vestíbulo tiene una longitud de 113 metros, por lo que no cubre totalmente el nivel del andén. En el nivel del vestíbulo existen dependencias para el personal, así como taquillas y máquinas para la adquisición de billetes. También se sitúan los tornos del control de acceso.

La cubierta tiene forma de arco y se escalona en los extremos del edificio, reduciendo su altura para resultar más acogedora en los extremos del andén (véase Figura 3).



Figura 3. Vista del estado actual (diciembre 2024) de la Estación 6 Jaltocán.

3.1 Análisis estructural

El análisis estructural de las estaciones se ha realizado con modelos globales elaborados con el programa SAP2000.

Para el diseño de los elementos metálicos, dado que la estructura presenta dos juntas de dilatación, se ha considerado que la estación funciona estructuralmente como tres elementos independientes (Figuras 4 y 5).

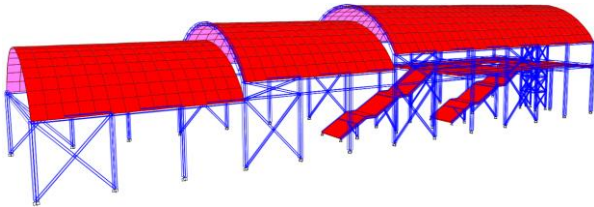


Figura 4. Modelo de cálculo de la zona lateral.

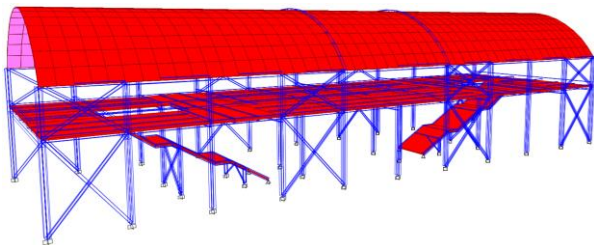


Figura 5. Modelo de cálculo de la zona central.

Para el diseño de los elementos de hormigón de la estación, se utiliza un modelo de estructura completa, con el fin de analizar de forma precisa los esfuerzos sobre la cimentación, la losa del andén y los muros de hormigón que soportan la estructura metálica (Figura 6).

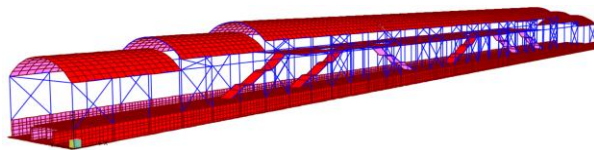


Figura 6. Modelo para cimentación y muros.

Para el diseño de los elementos mixtos hormigón-acero de la planta del vestíbulo, se ha realizado un modelo de cálculo con el que se analizan las vigas, los pernos de conexión y los forjados de chapa colaborante (Figura 7).

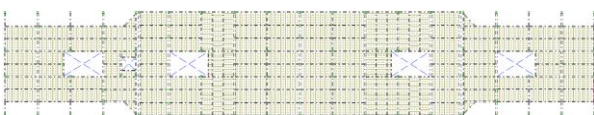


Figura 7. Modelo de cálculo del vestíbulo.

Todas las comprobaciones se han realizado utilizando la normativa mexicana de aplicación [1-7], que se relaciona en el apartado de Referencias.

Se ha efectuado un estudio de Mecánica de Suelos en cada emplazamiento, con sondeos, ensayos SPT y análisis en laboratorio de las muestras extraídas. Con esa información, el Área de Geotecnia establece las recomendaciones de cimentación para cada emplazamiento. Se han estudiado los asentamientos, teniendo en cuenta consolidaciones primarias y secundarias, estableciendo las tensiones admisibles para que los mismos se sitúen en rangos aceptables. Todo este estudio ha proporcionado como resultado los coeficientes de balasto necesarios para los modelos estructurales.

En cada estación las recomendaciones geotécnicas han sido diferentes. Esto ha dado lugar a que, en algunos casos, haya sido preciso realizar una sustitución del material situado bajo la losa de cimentación en un cierto espesor. Consecuentemente, las características del terreno y los módulos de balasto han variado entre las diferentes estaciones, lo que ha llevado a que incluso la acción sísmica sea diferente en cada una.

Las acciones consideradas en el cálculo estructural han sido las siguientes:

- Peso propio y cargas muertas
- Tren de carga ferroviaria
- Temperatura
- Sobrecargas en vestíbulo y andenes
- Viento
- Sismo

Esta última acción ha sido condicionante para el diseño de la estructura metálica que sustenta el vestíbulo y la cubierta. Según la regionalización sísmica de la República Mexicana, que se muestra en la Figura 1.2 del MDOC de la

CFE [3] (reproducida en la Figura 8), las estructuras se encuentran en la zona tipo B.

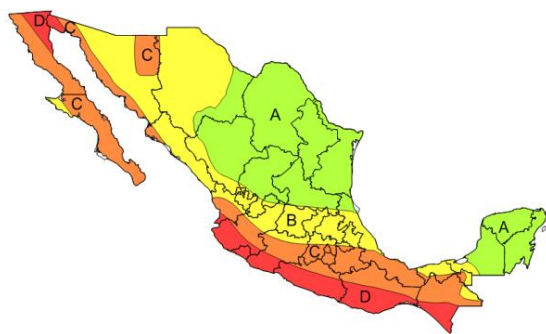


Figura 8. Zonas sísmicas en México.

La acción sísmica se calcula con la metodología propuesta por el manual de diseño sísmico de la CFE [3] y el programa PRODISIS v4.1, cuya salida se muestra en la Figura 9.

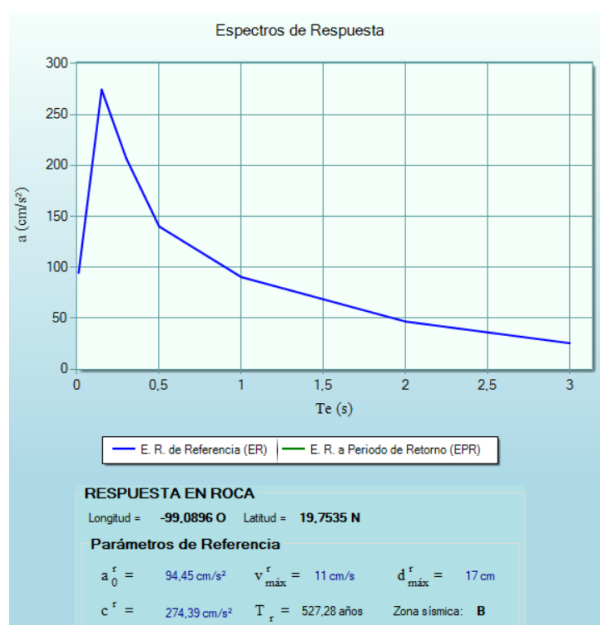


Figura 9. Espectro de respuesta en roca proporcionado por PRODISIS.

A continuación, resulta preciso establecer la clasificación de las construcciones (A2 en este caso). Se obtiene con ello un Factor de Importancia Estructural, de valor 1,5.

Para la definición del espectro de respuesta es preciso determinar las características del terreno de apoyo por debajo de la cimentación. Los parámetros mecánicos dinámicos pueden obtenerse correlacionando la velocidad transversal de la onda con el valor del golpeo SPT. Una vez determinados los

parámetros sísmicos dominantes de cada emplazamiento, se puede obtener el espectro elástico de respuesta, o espectro transparente (Figura 10). Este espectro es diferente en cada uno de los emplazamientos.

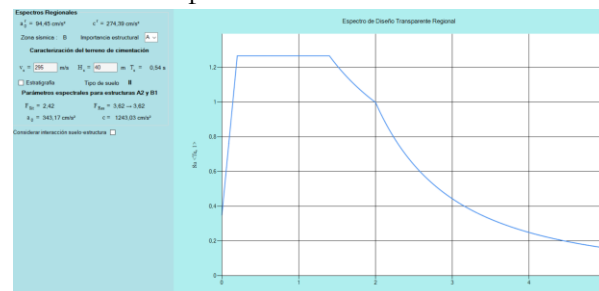


Figura 10. Espectro transparente.

A partir del espectro transparente y en función de las características de la estructura (factores reductores por sobrerresistencia, amortiguamiento estructural, factores de comportamiento sísmico, factor de redundancia y condiciones de regularidad), se obtienen los espectros de diseño para el estado límite de servicio (Figura 11) y los espectros de diseño en dirección longitudinal y transversal (Figura 12). Estos valores son los que se emplean como dato de entrada en el programa de cálculo estructural.

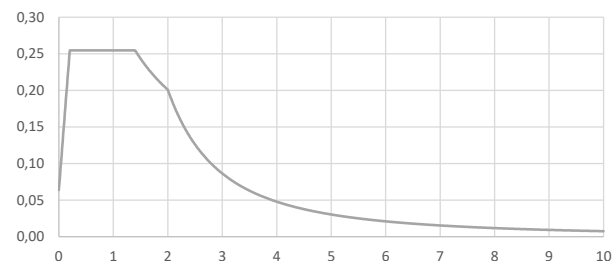


Figura 11. Espectro de diseño para el E.L.S.

Las acciones previamente relacionadas se han utilizado para las combinaciones de servicio y de diseño establecidas en la NTCCA-RCDF-2017 [1].

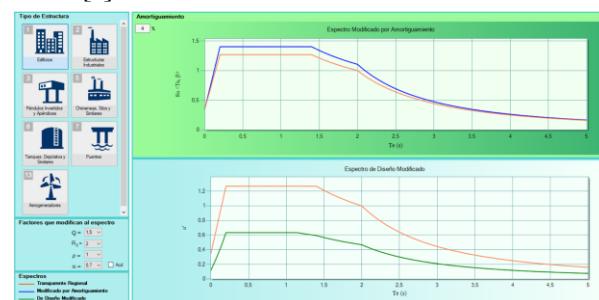


Figura 12. Espectro de diseño en dirección longitudinal para los módulos laterales.

3.2 Estructura metálica

En la estructura metálica se ha realizado la comprobación resistente de todas las barras, empleando para ello las capacidades que proporciona el programa de cálculo empleado.

Se han comprobado también las siguientes distorsiones:

- Distorsiones horizontales para seguridad contra colapso. Se estudian las diferencias de desplazamientos laterales entre el nivel del andén (y de los apoyos en los muros) y el nivel del vestíbulo, y entre éste y el nivel superior del ascensor.

- Distorsiones horizontales por limitación de daño a elementos no estructurales (límite de servicio).

- Distorsiones laterales para acciones de viento.

Las conexiones de los pilares embebidos en los muros tienen unas características especiales, por las altas cargas que es preciso transmitir (Figura 13). Para su comprobación, se han desarrollado hojas de cálculo específicas, implementando las comprobaciones de la normativa [6,7].

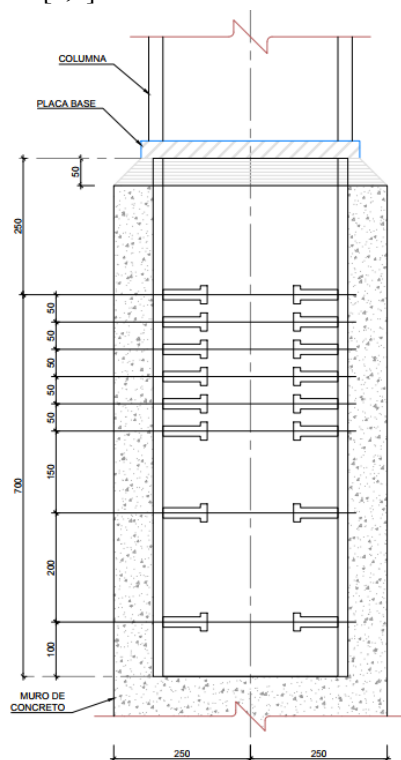


Figura 13. Sección de los pilares embebidos en los muros.

Para la comprobación del resto de las uniones, más habituales, se ha empleado el programa IDEA StatiCa. En la Figura 14 se muestran los resultados del programa de cálculo y en la Figura 15 la unión construida.

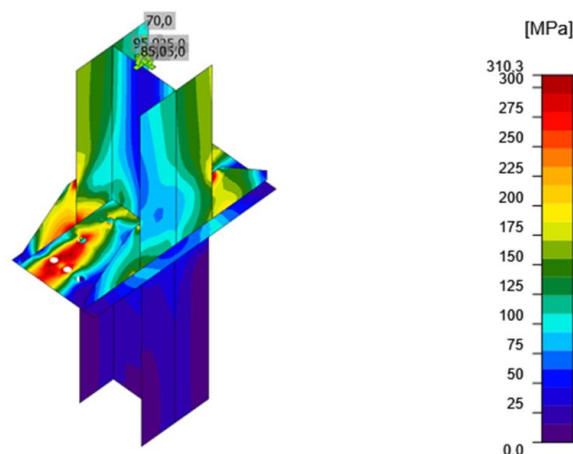


Figura 14. Modelo de cálculo de una unión.



Figura 15. Unión ejecutada en obra.

En la Figura 16 se muestra una vista de la estructura metálica del tramo lateral de la Estación de Nextlalpan. La vista está orientada hacia el centro de la estación. Se muestran los pilares laterales, arrancando del muro de hormigón, con una serie de arriostramientos en cruz de San Andrés. Al fondo se ve la escalera de subida al vestíbulo. Se aprecia un tramo de arcotecho colocado, así como la transición en el mismo.



Figura 16. Vista del tramo lateral de la estación de Nextlalpan. Estado de la construcción en diciembre de 2024.

3.3 Forjado del vestíbulo

El forjado del vestíbulo está constituido por un emparrillado de vigas metálicas sustentado por los pilares laterales y por otros que se apoyan en el andén. Tiene orificios para las escaleras y para el ascensor (véanse Figuras 17 y 18). Entre las vigas metálicas se dispone un forjado de chapa colaborante de 0,12 m de canto. Alberga oficinas y despachos en un lateral y los tornos de acceso. Se han realizado comprobaciones resistentes y de desplazamientos verticales.

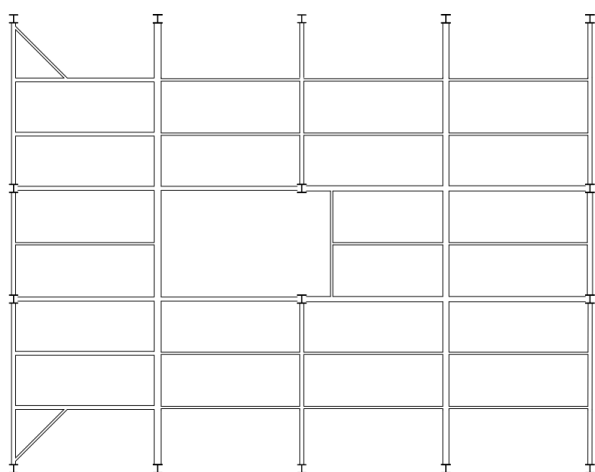


Figura 17. Emparrillado del módulo lateral.

3.4 Cimentación, muros y losa de andén

La cimentación se realiza mediante una losa de 0,65 m de espesor. En sus laterales se disponen dos muros de 0,50 m de espesor que, además de atenuar el riesgo de descarrilamiento, proporcionan apoyo a los pilares laterales. En la figura 19 se muestran las dimensiones de estos elementos en la Estación 6 Jaltocán.

Tal y como se ha indicado, el cálculo se realizó con un modelo global de la estructura, empleando modelos placa-laja, que permitieron dimensionar a flexión y a cortante, y comprobar la fisuración. El terreno se modelizó en cada estación con el módulo de balasto obtenido del estudio geotécnico.

4. Local técnico

Se trata de un pequeño edificio, situado en uno de los extremos de la estación, alejado de ésta 50 m, para permitir un crecimiento futuro de otros 50 m en caso necesario. Tiene unas dimensiones de 31,20 m de largo por 4,60 m de ancho.



Figura 18. Vista del vestíbulo de la Estación 6 Jaltocán. Se aprecian los huecos de escaleras y las estancias.

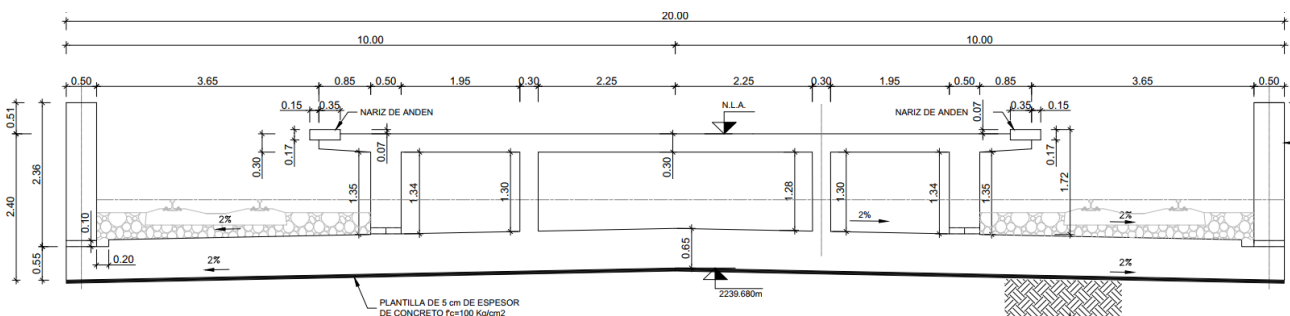


Figura 19. Definición geométrica de la losa de cimentación y andenes de la Estación 6 Jaltocán.

Está situado entre las vías del tren y tiene la función de contener diversos cuartos técnicos (subestación, grupo electrógeno, etc.) que dan servicio a la estación.

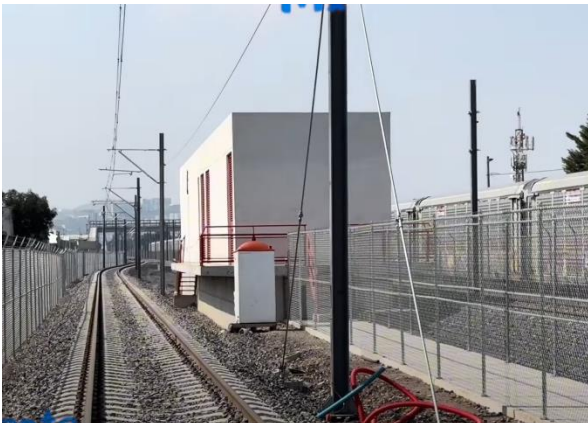


Figura 20. Local técnico Estación 1 Cuyamil.

Estructuralmente se cimenta sobre un cajón de hormigón, cuya losa superior se sitúa a la misma altura que los andenes. Todos los cerramientos se realizan mediante muros confinados, un sistema habitual en México para confinar los elementos de cerramiento con un entramado de vigas horizontales (dalas) y verticales (castillos) de hormigón armado, muy adecuado frente a las solicitaciones sísmicas. La cubierta se realiza con una losa de hormigón armado de 0,12 m de canto. En la Figura 20 se muestra el local técnico de la Estación 1 Cuyamil.

19,0 m ha requerido proyectar dos cerchas laterales de 3,50 m de canto, que proporcionan apoyo a las vigas transversales que sustentan un forjado de chapa colaborante. En el resto de vanos, no ha sido preciso disponer cerchas laterales, resultando suficiente con un entramado apoyado en las vigas transversales. La cimentación es directa, mediante zapatas, conectadas entre sí con riostras por los requerimientos sísmicos.

6. Conclusiones

Una vez que las seis estaciones se encuentran en construcción se llega al final del proceso de diseño, cálculo y construcción de un proyecto en el que se han visto involucradas multitud de disciplinas y en el que la coordinación entre las diferentes entidades públicas y compañías participantes ha resultado crucial para llevar a cabo unas estructuras que se encontraban muy condicionadas por un diseño que debía ser acorde con el de otras líneas similares, pero que a su vez estaba afectado por una acción sísmica elevada, unas características geotécnicas muy precarias, importantes limitaciones de espacio y que incorporaba modernos elementos arquitectónicos.

Agradecimientos

Propiedad y Dirección del Proyecto: Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Gobierno de la República de México.

Contratista: Ferrocarriles Suburbanos. A CAF Group Company.

Subcontratista: Rubau México.

Autoría del Proyecto: Proes.

Referencias

[1] Normas Técnicas Complementarias 2017 sobre Criterios y Acciones para el Diseño

Estructural de las Edificaciones (NTCCA-RCDF-2017).

[2] Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

[3] Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE. Diseño por Sismo.

[4] Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento.

[5] Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones.

[6] Normas Técnicas Complementarias para diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.

[7] Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero.