

VIII Concreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural ACHE

# Poso Avenue Underpass y SR-46 Underpass California High-Speed Train Project. Sierra "S" Subdivision. Fresno to Bakersfield / CP4.

# Jesús José CORBAL ALVAREZ<sup>a</sup>, Antonio GONZALEZ MEIJIDE<sup>b</sup>, Arturo ANTON CASADO<sup>b</sup>, Alberto ESTEBAN CASTRILLEJO<sup>c</sup>, Lorena FRANQUEIRA LOSADA<sup>c</sup>, Adrián PÉREZ CARBALLO<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en TEMHA S.L. y Professional Engineer (Texas/California). <u>corbal@temha.com</u> <sup>b</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en TEMHA S.L. Profesor Asociado UDC. <u>meijide@temha.com</u> / <u>anton@temha.com</u> <sup>c</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en TEMHA S.L. <u>esteban@temha.com</u> / <u>franqueira@temha.com</u> / <u>aperez@temha.com</u>

#### RESUMEN

El proyecto de ejecución de la línea de tren de alta velocidad de California (CAHSR) pretende conectar las ciudades de San Francisco y Los Ángeles en menos de tres horas, a velocidades superiores las 350 km/h. Esta línea forma parte del primer programa de tren de alta velocidad en EEUU.

Dentro del CP4 (Construction Package 4), correspondiente al tramo entre Fresno y Bakersfield, el tren atraviesa la ciudad de Wasco, para lo que se ejecutan dos estructuras que permitirán el soterramiento de la carretera SR46 (State Route 46) y de la avenida de Poso bajo la nueva línea de alta velocidad y bajo una línea de ferrocarril convencional existente correspondiente al tren BNSF (Ferrocarril Burlington-Santa Fe).

#### ABSTRACT

The California High-Speed Railway (CAHSR) project aims to connect the cities of San Francisco and Los Angeles in less than three hours, at speeds in excess of 220 mph. This line is part of the first high-speed train program in the United States.

Within the CP4 (Construction Package 4), corresponding to the section between Fresno and Bakersfield, the train crosses the city of Wasco, for which two structures are being built that will allow the SR46 road (State Route 46) and Poso avenue to be buried under the new high-speed line and under an existing conventional railway line corresponding to the BNSF train (Burlington-Santa Fe Train).

PALABRAS CLAVE: California HSR, soterramiento, pantalla de pilotes, hormigón pretensado, acero, Wasco.

KEYWORDS: California HSR, buried structure, pile walls, pretensioned concrete, steel, Wasco.

# 1. Introducción

El transporte ferroviario en Estado Unidos ha tenido una fuerte tradición, especialmente en el transporte de mercancías. California, en la búsqueda de una eficiencia energética, medioambiental y de incremento en la seguridad en los desplazamientos, se ha embarcado en el planeamiento y construcción de una línea de alta velocidad ferroviaria para pasajeros.

El proyecto de ejecución de la línea de tren de alta velocidad de California (CHSR) pretende conectar las ciudades de San Francisco y Los Ángeles en menos de tres horas, discurriendo a través del Valle Central (formado por el Valle de Sacramento y el Valle de San Joaquín), con tramos a velocidades superiores las 200 mph. En el futuro se pretende ampliar el trazado hasta las ciudades de Sacramento (al noreste de San Francisco) y San Diego (al sur de Los Ángeles) (ver figura 1). Esta línea forma parte del primer programa de tren de alta velocidad en EEUU.



Figura 1. Línea de alta Velocidad entre San Francios y Los Ángeles

El área de construcción del CP-4 es un tramo de 22 millas dentro de los condados de Tulare y Kern y las ciudades de Wasco y Shafter (figura 2). En este tramo la línea de ferrocarril atraviesa la ciudad de Wasco. Para permitir el cruce de la línea de alta velocidad a través de la ciudad se ejecutan dos estructuras que permitirán el soterramiento tanto de la carretera SR46 como de la avenida de Poso, de forma que el ferrocarril discurrirá a la cota actual del terreno natural.



Figura 2. Zona de ubicación de las estructuras

En esta zona, el ferrocarril de alta velocidad discurre paralelo a una línea de ferrocarril convencional existente de la compañía BNSF (Burlington Northern & Santa Fe), que cruza la avenida de Poso mediante un paso a nivel y atraviesa la carretera SR-46 mediante un paso elevado de un único vano. De este modo, uno de los condicionantes del proyecto durante la ejecución de las estructuras es el de poder realizar el soterramiento del tráfico rodado bajo las líneas de BNSF manteniendo en todo momento el tráfico ferroviario.

# 2. Poso Avenue Underpass

# 2.1 Descripción

En la zona Este de las afueras de la ciudad de Wasco, el trazado del ferrocarril de la línea de HSR discurre paralelo a la línea de ferrocarril de BNSF, cruzando ambas ortogonalmente la avenida de Poso. El cruce actual de la vía de BNSF con Poso Avenue se realiza con un cruce a nivel con barrera.



Figura 3. Vista en planta de Poso Avenue Underpass

El trazado de la línea de ferrocarril en la ciudad de Wasco se proyecta a cota de terreno natural. Ante la imposibilidad de realizar cruces a nivel en líneas de alta velocidad, resulta necesario soterrar la avenida de Poso, al amparo de pantallas de hormigón armado. Sobre la nueva avenida deprimida se proyectan tres estructuras independientes que permiten el cruce tanto de la nueva línea de alta velocidad de HSR como de la línea existente de ferrocarril de BNSF y de la avenida J-Street, que cruza ortogonalmente a la avenida de Poso (figura 3).

La estructura para el soterramiento de Poso se diseña con un gálibo horizontal de 67 pies (20.42m), para permitir albergar 4 carriles de 12 pies de ancho, 2 carriles por cada sentido de circulación, una mediana de 2 pies de ancho, arcenes laterales de 4 pies y medio y acera izquierda de 1 pie y medio y derecha de 4 pies y medio respectivamente.

Una de las peculiaridades de esta estructura es que al estar ubicada dentro de en un entorno urbano rodeada de viviendas familiares, no es posible realizar excavaciones a cielo abierto de gran propundidad. Este es el motivo por el que el soterramiento se realiza mediante pantallas de pilotes de hormigón armado que forman parte de la estructura definitiva, pudiendo prescindir de otros sistemas de contención provisional durante la ejecución de la obra (ver figura 5).

Dentro de las secciones que componen la estructura soterrada, pueden considerarse cinco zonas diferenciadas, que se describen a continuación.

#### 2.2 Secciones en trinchera

En la zona inicial de las rampas de acceso y salida de la estructura, donde el desnivel entre la rasante de Poso y la cota del terreno natural permite realizar una excavación sin necesidad de recurrir a medios de contención auxiliares, se proyectan muros de hormigón armado ejecutados "in situ" con cimentación superficial.



ménsula de hormigón armado



Figura 5. Vista en planta y alzado de Poso Avenue Underpass

Cuando la altura de los muros hace inviable realizar la excavación sin recurrir a medios auxiliares de contención, se proyectan muros ménsula compuestos por pilotes de hormigón armado de 3 pies de diámetro (0.91m) ejecutados cada 5 pies y medio (1.68 m). En coronación se ejecuta un zuncho de hormigón armado que une la cabeza de los pilotes.



Figura 6. Sección tipo en trinchera con muros en ménsula de pantalla de pilotes

Por último, cuando la altura de las pantallas es superior a los 20 pies, se disponen puntales de hormigón armado uniendo la coronación de ambas pantallas para reducir tanto los esfuerzos en los pilotes como las deformaciones horizontales del muro.



Figura 7. Sección tipo de muro apuntalado

#### 2.3 Tablero de HSR

Para el paso de la línea de alta velocidad de HSR sobre Poso Avenue se proyecta una losa maciza de hormigón pretensado de 43 ft de ancho y 5 pies de canto que se apoya sobre la pantalla de pilotes. En esta zona, el tablero se sustenta sobre un total de 11 pilotes por pantalla de 4 pies de diámetro (1.22m) dispuestos cuasi tangentes entre sí. La conexión entre los pilotes y el tablero se realiza de forma rígida de forma que el tablero hace de puntal entre ambas pantallas, empotrándose ligeramente la pantalla en de pilotes, reduciénndose así los momentos de flexión positiva en centro de vano.



Figura 8. Alzado y sección transversal del tablero HSR

#### 2.4 Tablero de BNSF

El cruce de la línea de ferrocarril de BNSF sobre Poro Avenue se resuelve con un tablero metálico formado por vigas de acero con sección doble T sobre la que se dispone una chapa de acero. Uno de los condicionantes que impuso BNSF es que el tablero no podía actuar como puntal entre las pantallas, por lo que el tablero se apoya sobre aparatos de apoyo de neopreno, anclándose el tablero a una de las dos pantallas de la estructura.



Figura 9. Alzado y sección transversal del tablero BNSF

El tablero definitivo tendrá una anchura de 100 pies, ejecutándose en 3 fases que permitirán la construcción del mismo sin necesidad de interrupir el tráfico ferroviario de las líneas existentes. En la primera fase se ejecutan 46 pies de tablero, junto a las vías actuales. Sobre esta parte del tablero se dispondrán dos vías denominadas "Shoofly" que servirán para el desvío provisional del tráfico ferroviario durante la ejecución de la fase 2 del tablero. En esta segunda fase se construyen otros 64 pies de tablero (totalizando 110 pies), permitiendo reponer las vías de BNSF en su posición actual. Por último, en la última fase de construcción, se retiran tanto las vías del "Shoofly" como la parte del tablero de la fase 1 que queda fuera de la zona propiedad de BNSF, dejando un tablero de 100 pies de ancho, que permitirá disponer a BNSF de un espacio adicional para la ejecución de vías adicionales en el futuro sin necesidad de ampliación del tablero.

#### 2.5 Tablero de J-Street

El último de los tableros permite el cruce de la calle J-Street sobre la avenida de Poso. Se trata de un tablero de hormigón armado, que se apoya sobre las pantallas de pilotes mediante una conexión que no transmite momentos. De este modo, se consigue que el tablero funciones como biapoyado, ejerciendo de puntal entre las pantallas, sin transmisión de momentos.

#### 3. SR-46 Underpass

#### 3.1 Descripción

En la zona Noreste de las afueras de la ciudad de Wasco, el trazado del ferrocarril de la línea de HSR discurre paralelo a la línea de ferrocarril de BNSF, cruzando ambas ortogonalmente la carretera SR-46.



Figura 10. Vista en planta de SR-46 Underpass

El cruce actual de línea de BNSF sobre la SR-46 se realiza mediante un paso superior de un único vano, de tablero metálico y estribos cerrados de hormigón armado.

El diseño de la estructura de HSR se ha compatible realizado con un futuro desdoblamiento de la calzada de la SR-46, por lo que el diseño incluye la ejecución de la nueva estructura de la SR-46, así como la sustitución de la estructura actual de BNSF (figura 11) por una estructura de dos vanos, con pila en la mediana de la futura SR-46 (figura 10). Además, la ejecución contempla la depresión actual de la rasante, debido a que el gálibo actual en la estructura es inferior al exigido actualmente en la normativa vigente.



Figura 11. Estructura actual de BNSF sobre SR-46

Al igual que en el caso de Poso Avenue Underpass, la nueva plataforma de la SR-46 se diseña en trinchera al amparo de muros de pilotes de hormigón armado que servirán tanto para la contención provisional de tierras durante la excavación de la plataforma como formarán parte de la estructura definitiva (ver figura 12).

La sección tipo de la SR-46 se diseña con un gálibo horizontal total entre pantallas de pilotes de 117 pies (35.66m), que permitirá albergar dos calzadas separadas compuestas por 2 carriles de 12 pies de ancho y arcenes interiores y exteriores de 5 y 8 pies respectivamente, separadas por una mediana central de 17 pies de ancho, donde se ubicarán las pilas intermedias de las estructuras de CAHSR y de BNSF. A petición de Caltrans, A ambos lateraless de las cazadas se disponen de sobreanchos de 11 pies y medio y 12 pies y medio respectivamente, hasta completar los 117 pies de gálibo total.

Dentro de lase secciones que componen la estructura soterrada, pueden considerarse tres zonas diferenciadas:

- Secciones en trinchera al amparo de pantallas de pilotes de hormigón armado.
- Tablero de HSR
- Tablero de BNSF



3.2 Secciones en trinchera

En la zona inicial de las rampas de acceso y salida, se proyectan muros ménsula compuestos por pilotes de hormigón armado de 3 pies de diámetro (0.91m)ejecutados con una separación máxima de 5 pies y medio (1.68 m). En la margen derecha de la SR-46, donde resulta factible, se prescinde de la pantalla de planteanado excavación pilotes, mediante desmonte.

#### 3.3 Tablero de HSR

Para el paso de la línea de alta velocidad de HSR sobre la SR-46 se proyecta una estructura de 2 vanos de 60.75 pies de longitud (18.52 m), con un tablero compuesto por 6 vigas prefabricadas pretensadas de 5 pies de canto, sobre las que se ejecuta una losa de hormigón armado. Durante la construcción, las vigas peso correspondiente soportan el al hormigonado de la losa de forma isostática. Junto al hormigonado de la losa, se hormigona la riostra del tablero sobre pilas, dándonse continuidad estructural a la sección compuesta por las vigas y la losa, de forma que la estructura trabaja de forma hiperestática ante el resto de acciones permanentes y variables que actual sobre el tablero.



Figura 13. Sección transversal tipo del tablero HSR

El tablero se apoya en los extremos sobre sendas pantallas de pilotes de 4 pies de diámetro (1.22m) dispuestos cuasi tangentes entre sí. La pila central está compuestos por dos fustes circulares de 5 pies de diámetro (1.52m) empotrados tanto en el tablero como en su base en dos pilotes (uno por fuste) de 8 pies de diámetro (2.44 m). Esta configuración garantiza que la formación de rótulas plásticas durante un sismo extremo se produce en los fustes y no en los pilotes, de forma que resulte fácilmente inspeccionable y reparable. Este es uno de los condicionantes de diseño tanto del CSDC [1] como del DCM [5].



Figura 14. Alzado Tablero HSR

#### 3.3 Tablero de BNSF

El cruce de la nueva estructura de BNSF sobre la SR-46 se resuelve con un tablero metálico de dos vanos isostáticos de 58.75 pies (17.91 m) formado por vigas de acero con sección doble T unidas por mamparos transversales dispuestos a octavos de luz. Sobre las vigas longitudinales, soldada al ala superior de la viga, se dispone una chapa de acero sobre la que se dispone el balasto de las vías. El empleo de esta tipología de tablero metálico con vanos isostáticos fue requisito de BNSF.





La subestructura se diseña para albergar un tablero de anchura 100 pies (30.48 m), correspondiente a la zona de propiedad de BNSF (Right of Way of BNSF), para permitir ejecutar futuras ampliaciones de la sección del tablero sin afección a la SR-46. Sin embargo, el tablero se diseña con una anchura menor a la de la subestructura, 77 pies y medio, compatible con las necesidades actuales del tráfico de BNSF. Al igual que en el caso de Poso, el tablero se ejecuta en 3 fases que permitirán la construcción del mismo sin necesidad de interrupir el tráfico ferroviario de las líneas existentes. En la primera fase se ejecutan 50 pies de tablero, junto a las vías actuales. Sobre esta parte del tablero se dispondrán dos vías denominadas "Shoofly" que servirán para el desvío provisional del tráfico ferroviario durante la ejecución de la fase 2 del tablero. En esta segunda fase se construyen otros 40 pies de tablero (totalizando 90 pies), permitiendo reponer las vías de BNSF en su posición actual. Por último, en la última fase de construcción, se retiran tanto las vías del "Shoofly" como la

parte del tablero de la fase 1 que queda fuera de la zona propiedad de BNSF, dejando un tablero de 77 pies y medio de ancho.

El tablero se apoya en sus extremos sobre sendas pantallas de pilotes de 4 pies de diámetro (1.22m) dispuestos cuasi tangentes entre sí y en la zona central en una pila compuesta por cuatro fustes de sección circular de 5 pies y medio de diámetro (1.68m) que se empotran en su base en cuatro pilotes (uno por fuste) de 8 pies de diámetro (2.44 m).

#### 4. Normativa de diseño

En ambas estructuras existen tableros de tren de alta velocidad y ferrocarril convencional. Además, en el caso de Poso existe un tablero de carretera, por lo que ha sido necesario usar diversa normativa.

La normativa de aplicación en ha sido la AASHTO[3] (con las California Amendments). Para el diseño de la estructura de CAHSR, se han seguido las indicaciones del DCM (Design Criteria Manual), suministrado por la CAHSRA, tanto en lo relativo al cálculo de acciones como en lo relativo a las comprobaciones de seguridad y confort de los pasajeros, interacción vía-estructura, análisis dinámico,etc. En ambos casos las comprobaciones estructurales se han realizado según la AASHTO (con las California Amendments) y el análisis sísmico se ha realizando acorde a las indicaciones de las *Seismic Design Criteria* de Caltrans.

En el caso del tablero de BNSF la normativa de diseño ha sido la AREMA[4], salvo en lo relativo a las secciones de hormigón armado, donde se ha seguido la AASHTO.

#### 5. Análisis sísmico

Aunque California es una zona sísmicamente activa, las estructuras analizadas se ubican en una región relativamente inactiva, el Valle de San Joaquín. Aun así, el análisis sísmico ha sido condicionante en todas las estructuras. Una de las particularidades que cabe mencionar en esta estructura es que el análisis sísmico ha sido diferente en función de si el tramo de estructura pertenece a Caltrans, CAHSR o BNSF, ya que segúna la normativa sísmica de aplicación que corresponda los condicionantes sísmicos difieren.

En el caso de la zona de tráfico no ferroviario (tablero de J-Street y secciones en trinchera), la normativa de diseño es la correspondiente al Seismic Design Criteria de Caltrans. En este caso, la normativa define un único espectro de respuesta sísmica correspondiente a un sismo con un período de retorno de 975 años. El diseño sísmico está enfocado a garantizar el "no colapso" de la estructura, permitiéndose la formación de rótulas plásticas en elementos puntuales de la subestructura y nunca en la superestructura.

En el caso de los tableros de CAHSR rige lo indicado en el DCM[2] (apoyándose en el *Seismic Design Criteria* de Caltrans para los aspectos no contemplados en el DCM), donde se contemplan dos situaciones sísmicas:

- Máximo Sismo Considerado (MCE): sismos correspondientes al mayor del espectro probabilista con un período de retorno de 950 años o un espectro determinista basado en la mayor respuesta media resultante de la máxima ruptura de cualquier falla en las proximidades de la estructura. En esta situación se exige el "no colapso" de la estructura.

- Sismo Básico Operativo (OBE): sismos correspondientes a un período de retorno de 50 años. Durante la acción de este sismo, la estructura debe ser operativa para el paso del ferrocarril, por lo que se considera tanto para las comprobaciones de ELU como en lo relativo a las comprobaciones de seguridad y confort de los pasajeros, interacción víaestructura, etc.

La interpretación de los anteriores criterios fue llevada a cabo directamente con la CAHSRA, obteniendo el siguiente espectro.



Figura 16. Espectro de respuesta elástica para HSR

Por último, en el caso de los tableros de BNSF, se consideran 3 situaciones sísmicas, correspondientes respectivamente a situaciones de servicio, de estado límite último y supervivencia de la estructura. Para cada uno de las situaciones la AREMA define un espectro de respuesta elástica en función de unos períodos de retorno que se obtienen a su vez en función de 3 parámetros:

- Factor de seguridad inmediata: factor que contempla la capacidad de una estructura de resistir un sismo de baja intensidad, sin sufrir daño y sin alteración del tráfico.
- Factor de reparación inmediata: factor que define la facilidad de una estructura de ser reparada en caso de sufrir daños menores.
- Factor de reemplazo: considera la capacidad de superar un sismo de gran intensidad.

El diseño de las estructuras de HSR se ha realizado mediante un doble análisis:

El primer análisis se realiza con el GTS programa Midas siguiendo una metodología basada en la denominada sísmica", "desangulación adecuado para estructuras enterradas. Para ello, se ha realizado un modelo conjunto bidimensional del terreno y de la estructura, donde se representa el comportamiento del terreno con un modelo Mohr-Coulomb. En un primera fase se obtiene el campo de desplazamientos del terreno en un modelo de campo libre, es decir, sin presencia de la estructura. En una segundo fase se modela el terreno junto con la estructura, imponiendo a los límites del terreno (suficientemente alejados del área de influencia de la estructura) el campo de desplazamientos obtenidos en el modelo de campo libre y obteniendo las deformaciones y esfuerzos en la estructura.

En el segundo análisis se ha modelado la estructura en 3D de forma aislada con el programa Midas Civil, representando la respuesta del terreno mediante muelles de comportamiento no lineal, to obtenidas de los datos geotécnicos del terreno.

Se realiza un análisis no lineal en el tiempo, tanto para el sismo MCE como para el OBE, empleando en cada caso un total 7 acelerogramas, donde cada *set* de acelerogramas posee 3 componentes, H1, H2 y V.



Set 1 en su componente H1

Con este procedimiento, se obtienen los esfuerzos en todos los elementos de la estructura. Al tratarse de una estructura elementos difícilmente enterrada. con inspeccionables, se dimensionan todos los elementos de la estructura para que permanezcan en régimen elástico ante el sismo MCE. Sin embargo, se realiza un análisis de capacidad Pushover, donde se lleva la estructura al colapso, viendo qué ocurre si se somete a la estructura a demandas superiores a las del MCE, obteniendo la posición de plastificación de las secciones de los pilotes y dimensionando la superestructura para los esfuerzos de sobrecapacidad asociados al colapso de la subestructura (120% de los esfuerzos asociados a la formación del número de rótulas plásticas necesarias en la subestructura para que se produczca el colapso de la misma).

#### 5. Conclusiones

La experiencia de trabajo desarrollada en las estructuras de Poso Avenue Underpass y SR-46 Underpass ha sido enriquecedora, pues nos ha llevado a emplear criterios de diseño ferroviario y sísmico diferentes a los empleados en los proyectos desarrollados en España.

El Proyecto fue aprobado por la Authority y actualmente se encuentra en trámites para comenzar con la construcción por parte del equipo de CRB.

# Agradecimientos

Desde Temha, queremos dar las gracias a todos aquellos que han estado implicados en la fase de proyecto. En especial, queremos agradecer la cordial relación y el apoyo en las comunicaciones con la Propiedad

Agradecer también a Euroestudios (TPF Ingenieria) por desarrolla el proyecto de parte del CP4, coordinando con Temha aspectos que afectan a las estructuras. En especial a :

- Ramón Moreno. ramon.moreno@tpfingenieria.com
- Diego González. diego.gonzalez@tpfingenieria.com
- Rafael Larrea. rafael.larrea@tpfingenieria.com

A la Dirección técnica de Ferrovial, por la colaboración en aspectos del diseño.

A todos los miembos de *California* Rail Builders (Ferrovial) que han participado en el desarrollo del proyecto. En especial a:

- Pere Villalba. Structures Design Manager pvillalba@ferrovial.com
- Borja Solano. Alignment and Roadway Design Manager. <u>bsolano@ferrovial.com</u>

Finalmente, la colaboración para generar un proyecto bajo los estándares de California de:

- Greg L. Rende. P.E. President. Rende Consulting Group Inc. greg@rendeconsulting.com

# Referencias

- [1] Caltrans Seismic Design Criteria version 1.7
- [2] California High-Speed Rail Authority. Design Criteria Manual. Book III.
- [3] American Association of Highway and Transportation Officials. Bridge Design Specifications.
- [4] American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. Volume 2 – Structures.