

Ampliación de los puentes del segmento 2W de la autopista North Texas Expressway

Segment 2W bridge widenings in the North Texas Expressway

José Manuel Martínez García ^a, Clara Coromina Nestares ^b, Ángela Martín Ochoa ^b,
Nicolás Vallina Pita ^b, y Andrea Castro Hernández ^b

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. WSP Spain - APIA. Responsable Departamento de Puentes.

JoseManuel.MartinezGarcia@wsp.com

^b Ingeniera/o de Caminos, Canales y Puertos. WSP Spain - APIA. Departamento de Puentes.

RESUMEN

El proyecto amplía 11 puentes de vigas utilizando las mismas tipologías. El aspecto clave es el diseño de los estribos, limitado por los muros de tierra armada construidos en la etapa anterior, con un ancho que preveía esta futura expansión. Se han desarrollado dos soluciones principales que garantizan una construcción de la ampliación de los cargaderos sin afección a los flejes traseros de los muros de tierra armada existentes. En la primera, los apoyos de los estribos se colocan retranqueados por delante de los existentes. En la segunda, la adoptada, éstos se alinean con los existentes, con cargaderos apoyados en micropilotes que son ejecutados entre los flejes de los muros existentes.

ABSTRACT

The project expands 11 girder bridges using similar typologies. The key aspect is the abutments supports design, constrained by the details of the MSE walls constructed in the previous stage, with a width that anticipated this future expansion. Two main solutions were developed to widen the bridges without damaging the straps of the MSE walls. In the first, abutment supports were offset from existing ones. In the adopted second solution, abutment caps align with the existing ones, founded on micropiles drilled between the straps of the existing MSE wall.

PALABRAS CLAVE: Texas, tableros de vigas, ampliación puentes, vigas doble T, vigas prefabricadas.

KEYWORDS: Texas, decks with girders, bridge widenings, prestressed I-girders, precast girders.

1. Introducción

El proyecto consiste en la mejora de capacidad de la autovía estatal SH183 y la SH121, tras su cruce con la autovía interestatal IH820, finalizando antes de Industrial Boulevard para la SH183 y Murphy Dr para la SH121 en el condado de Tarrant, Texas (EEUU).

Estas carreteras, así como los puentes que comprenden, habían sido construidas en torno al año 2011. Durante el proceso de diseño y

construcción ya se había tenido en cuenta el crecimiento estimado del área metropolitana de Dallas-Fort Worth y se había considerado que la ampliación de estos puentes sería necesaria en un futuro. Una peculiaridad de estas carreteras es que contarán con carriles tanto de autovía (exteriores, o “general purpose lanes”) como de autopista (interiores, o “managed lanes”).

Para las estructuras incluidas en dichos tramos, la mejora de capacidad se traduce en la ampliación de once puentes de vigas prefabricadas de hormigón pretensado. Diez de ellos son cruces sobre calles transversales a diferente nivel, y el restante, una bifurcación de autopista.

Al tratarse de ampliaciones, y siguiendo la normativa del departamento de transportes de Texas (TxDOT), se han utilizado tipologías similares a las existentes. Los tableros consisten en vigas doble T prefabricadas (tipo Tx54 en una de las estructuras, y Tx62 en el resto) y una losa superior hormigonada in situ.

La singularidad de estas ampliaciones se encuentra en los puentes que materializan los cruces, por lo que se deja aquí de lado el que materializaba la bifurcación de la autopista. Los puentes de este tipo que se amplían tienen 2 o 3 vanos cada uno, con luces de entre 38.94 ft y 134

ft (11,87 m y 40,84 m). Los tableros están constituidos por vigas tipo Tx62, y una losa de hormigón de 8 in (20 cm).

Las pilas interiores mantienen la estética de las existentes: cabezal cuadrado con columnas de sección circular de hormigón armado.

2. Fases de diseño

2.1 Análisis de la situación

La peculiaridad y el reto que ha supuesto el diseño de la ampliación de estos puentes se sitúa en los estribos.

Los estribos existentes consisten en cargaderos con pilotes perforados de hormigón armado. Estos se sitúan por detrás de muros de tierra armada (o “MSE walls”), como se muestra a continuación.



Figura 1. Estribos de Central Drive antes de la ampliación.

Pronto en el proceso de diseño, durante las tareas de recopilación de la información existente, se llegó a la conclusión de que era preferible no contar con la presencia de camisas metálicas que aseguraran la perforación limpia de los pilotes necesarios para la ampliación por detrás de los muros de tierra armada existentes. Éstos habían sido diseñados teniendo en cuenta la futura ampliación, como se puede ver en las

imágenes anteriores, con configuraciones geométricas compatibles con ella.

No obstante, la perforación de un pilote en el trasdós de un muro de tierra armada sin la protección que otorga una camisa metálica cuya posición esté perfectamente definida, habría puesto en riesgo los flejes de éstos, suponiendo un peligro para la integridad del muro si éstos quedaran afectados.

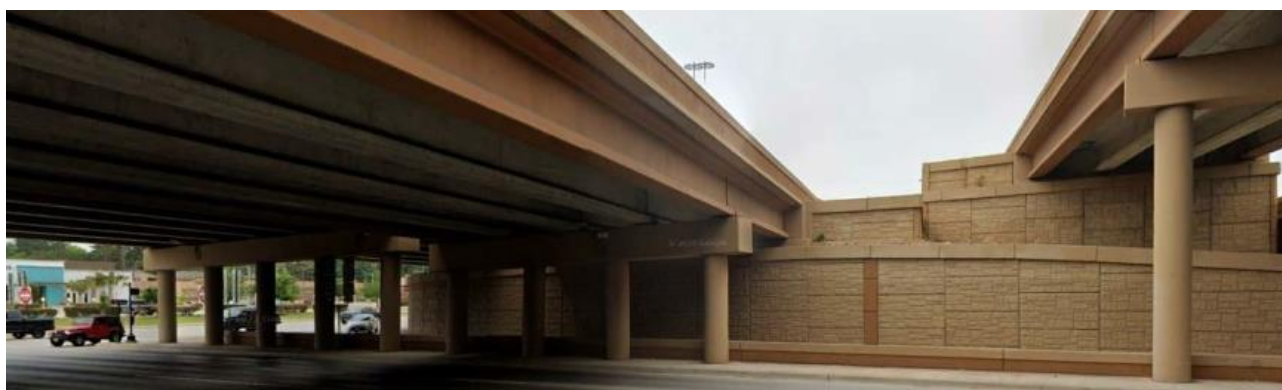


Figura 2. Estribos de Precinct Line antes de la ampliación.

Los flejes dispuestos en el trasdós de los muros de tierra armada existentes tienen configuraciones complejas que complican el diseño de la solución. Además, existe un factor añadido, que es la incertidumbre derivada de la tolerancia de construcción, por lo que no sería posible garantizar que estos flejes no hubieran sido dispuestos con ciertas desviaciones respecto a lo indicado en los planos de taller disponibles. Todo ello sumado suponía un alto grado de incertidumbre para la construcción de pilotes estándar de hormigón en el trasdós de los muros.

En el estado de Texas, el diseño de los estribos está muy estandarizado, consistiendo en cargaderos durmientes con cimentaciones de pilotes de hormigón perforados (o “drilled shafts”), como los de los puentes existentes a ampliar, o pilotes metálicos tipo H (o “H piles”). Cualquier otra propuesta diferente a este tipo de estribos es algo a lo que el TxDOT no está habituado, requiriendo mayores justificaciones para su aprobación.

Las ampliaciones con pilotes metálicos en forma de H tienen también la misma problemática de la alta posibilidad de interferir con los flejes de los muros existentes debido al poco espacio existente entre ellos.

Dadas las condiciones de partida para la ampliación de los puentes existentes, las únicas soluciones factibles no son las habitualmente construidas en la zona, lo que añade dificultad para la aprobación final.

2.2 Estudio de las diferentes alternativas

En una fase temprana del proyecto, tras haberse analizado la situación existente, se plantearon una serie de posibles soluciones no estándares para poder resolver el problema, estudiando sus pros y sus contras.

Las propuestas debían ser factibles desde distintos puntos de vista:

- Geométricamente posibles.
- Compatibles con los muros de tierra armada existentes.
- Estructuralmente viables.

Tras este primer estudio se llegó a nueve distintas alternativas, de las cuales varias de ellas exigían un análisis estructural avanzado.

Los puentes fueron agrupados en función de sus dimensiones, y cada una de las alternativas fue estudiada para cada grupo.

Dada la cantidad de alternativas y de grupos de puentes, se adoptó un enfoque basado en la automatización, desarrollándose modelos paramétricos que reproducían todas las fases constructivas de cada solución, desde que el puente existente se construyó, hasta el final de la vida útil del puente ampliado, permitiendo así una evaluación fina de los efectos reológicos.

Algunas de las alternativas se fueron descartando por diferentes motivos, como son los siguientes:

- Incompatibilidad de mantenimiento de un mínimo tráfico durante la construcción.

- Esfuerzos excesivos en pilotes existentes.
- Esfuerzos excesivos en columnas (o fustes de pilas) existentes.
- Esfuerzos excesivos en cabezales de pilas existentes.

- Esfuerzos y/o tensiones excesivas en vigas existentes.

Finalmente, se consideraron dos soluciones como las óptimas, teniendo en cuenta las condiciones de las que partía este proyecto. Estas propuestas se describen en los siguientes apartados.

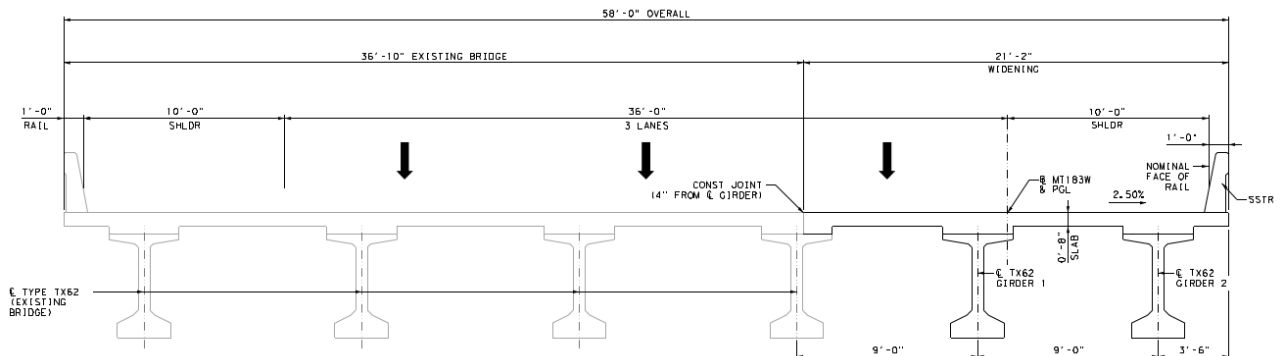


Figura 3. Ampliación lateral de los puentes existentes.

3. Soluciones desarrolladas

El concepto general de las dos soluciones descritas en este apartado consiste en ampliar lateralmente los tableros existentes mediante la colocación de varias vigas del mismo tipo, hidrodemoliendo primero los voladizos laterales de la losa existente, y posteriormente creando una unión monolítica con la losa superior in situ.

Las barras transversales de la losa de ampliación se solapan con las existentes sobre la viga lateral. El uso de hidrodemolición es necesario para asegurar que las barras existentes no se dañan durante el proceso.

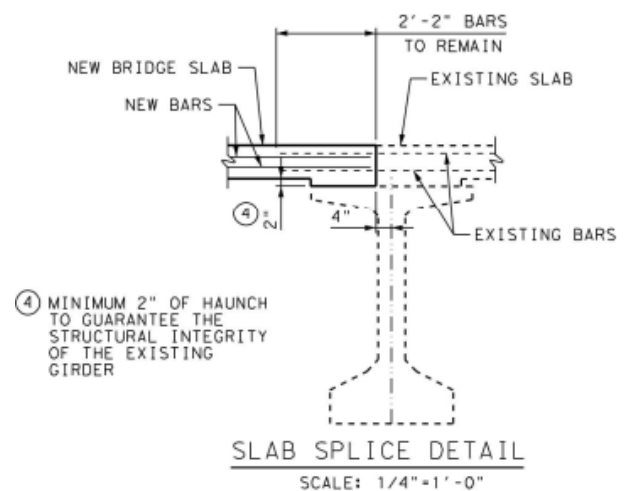


Figura 4. Detalle de solape de barras transversales.



Figura 5. Esperas de armaduras transversales en Central Drive tras hidrodemolición.

3.1 Solución inicial. Cargaderos de estribos retranqueados respecto a los existentes

En esta solución, los cabezales de los apoyos de estribos de la parte ampliada del tablero quedan retranqueados respecto a los existentes. Así, los nuevos apoyos de las vigas se sitúan por delante del muro y, como consecuencia, la parte de las vigas por detrás del apoyo en el nuevo estribo queda en voladizo, configuración para la que una viga prefabricada estándar no está preparada por aparecer momentos flectores negativos.

Con el fin de retener las tierras y evitar filtraciones, se adaptaron los elementos que sirven de continuación a los cargaderos existentes, que se denominarían “end caps”, consistiendo en unos muretes cimentados superficialmente que se conectan a los cargaderos existentes, y sobre los cuales no se apoyan las vigas, según se muestra en la siguiente figura.

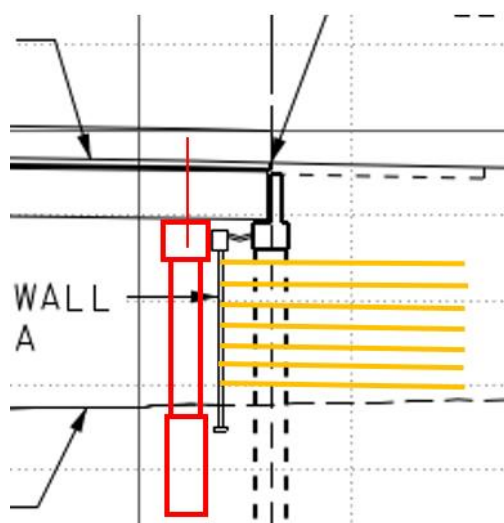


Figura 6. Esquema de la propuesta. En negro se representa el estribo existente y en rojo en nuevo.

Las ventajas de esta alternativa, entre otras, son los siguientes:

- No se necesita demoler y reconstruir el muro de tierra armada existente (solo la parte superior para ajustes geométricos).

- No se requiere excavar detrás de los muros de tierra armada existentes (solo la parte superior para los “end caps”).
- No existe riesgo de romper flejes.

No obstante, esta solución también cuenta con inconvenientes, algunos de los cuales llevaron a que no se llegase a adoptar, como son:

- Las vigas necesitan resistir momentos negativos, por lo que su diseño es algo diferente al estándar pudiendo suponer un problema con los fabricantes. La distribución de cortantes también difiere a la típica viga biapoyada.
- La luz de las vigas de los vanos laterales es algo diferente a la de las existentes adyacentes, por lo que hizo falta un análisis estructural detallado del comportamiento de los tableros, para garantizar el correcto funcionamiento de la losa que une el tablero existente con la parte de la ampliación.
- Requieren de la aprobación de algunas “Design Deviations” por parte del TxDOT, lo que complica el proceso.
- Impacto visual.

Esta solución implica la presencia de la pila-estribo por delante del muro de tierra armada, lo que reduce el espacio para el tránsito de peatones en los casos en los que éste hubiera sido destinado a acera. Esto ha supuesto un serio obstáculo para la aprobación del diseño por lo inusual de la solución.

En estos casos, este tipo de solución suele requerir la instalación de barreras de seguridad adicionales debido a la disminución del gálibo horizontal respecto a la situación original.

Además, esta geometría del tablero ha exigido un estudio detallado de los esfuerzos generados por la diferencia de luces entre las vigas existentes y las nuevas. Así, se ha realizado un análisis exhaustivo del tablero más desfavorable, es decir, el del puente donde las vigas resultaban tener un voladizo mayor y la diferencia de luces entre las vigas nuevas y las adyacentes era más importante.

Este análisis tiene el objetivo de verificar si el armado de la losa estándar, que era el empleado en los tableros existentes, es suficiente para la nueva situación, en donde el eje de los estribos nuevos está retranqueado respecto a la posición de los estribos originales. También se comprueban las flechas relativas entre las vigas existentes y las nuevas, en la sección de junta.

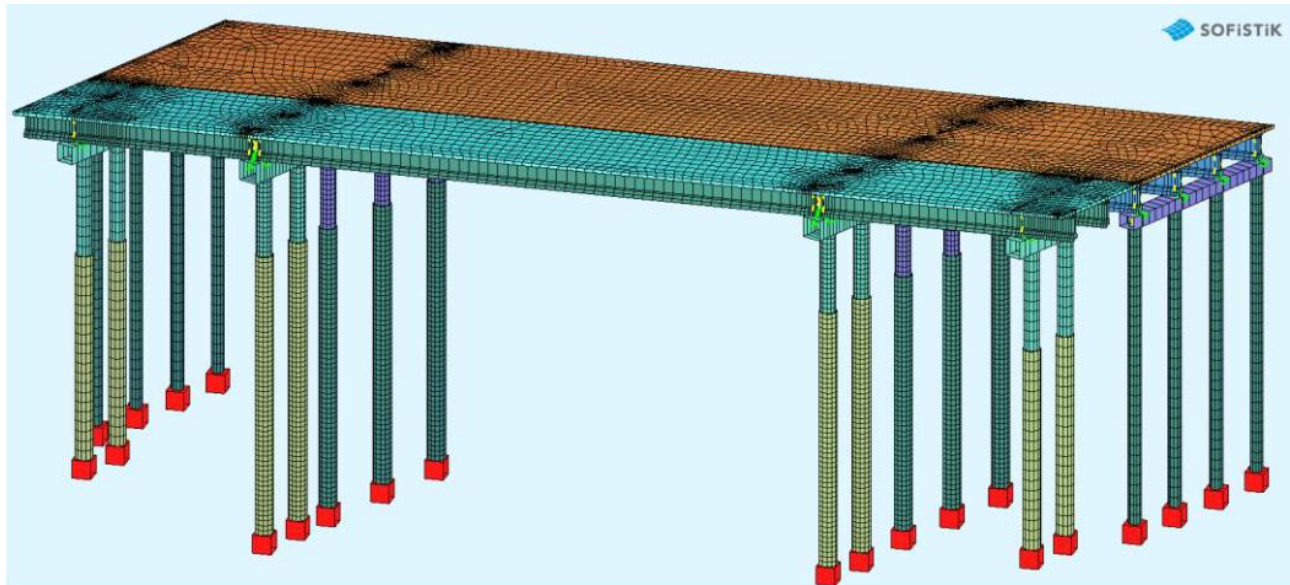


Figura 7. Modelo de elementos finitos paramétrico.

El modelo considera la interacción de las cimentaciones con el terreno, y tiene en cuenta la secuencia constructiva con precisión, considerando entre cada fase los procesos reológicos que se habrían ido produciendo, con los 10 años que han pasado entre la construcción del puente original y su ampliación, y 100 años de vida útil del puente.

En el análisis se aplican las cargas vivas de tal manera que se maximicen los esfuerzos en la losa superior de conexión y en las vigas, con el cálculo de las envolventes correspondientes.

Se consideran tanto el camión de diseño de la AASHTO como el vehículo tándem de esta normativa, con sus huellas correspondientes, así como el efecto dinámico (33%) y el factor de presencia múltiple. Estas cargas verticales se pasean longitudinal y transversalmente sobre toda la losa, base de la envolvente de sobrecargas.

Para el dimensionamiento de la armadura de la losa se analizan tanto las combinaciones de

Para realizar los análisis estructurales necesarios, se ha preparado un modelo paramétrico que es capaz de generar todos los puentes del proyecto. Para ello se ha utilizado software estructural avanzado de elementos finitos SOFiSTiK:

estado límite último, como las de servicio, en las que se limita la tensión de las barras a 36 ksi.

La conclusión del estudio es que la armadura estándar de la losa es también válida para la nueva configuración de los tableros propuestos en este proyecto, con la salvedad de que no se permite usar paneles de hormigón prefabricados (o “PCPs”) en las proximidades de los apoyos, ya que, al aparecer esfuerzos concentrados en la losa de conexión entre puente existente y ampliación cuando las luces de las vigas adyacentes son distintas (vanos laterales de cada puente), ésta necesita todo el canto útil para resistirlos, y en particular para evitar una fisuración excesiva.

Se prescribe que la losa del nuevo tablero debe ser hormigonada en dos fases: primero el voladizo lateral y la losa que une entre sí las vigas nuevas y, en una segunda fase, la losa de unión definitiva entre la zona de ampliación del tablero y la existente.

3.2 Solución adoptada. Cargaderos de estribos alineados con los existentes

En esta segunda solución, finalmente adoptada, los estribos quedan alineados con los existentes. Los cabezales se ejecutan sobre micropilotes metálicos que se sitúan entre los flejes del muro existente, según se muestra a continuación:

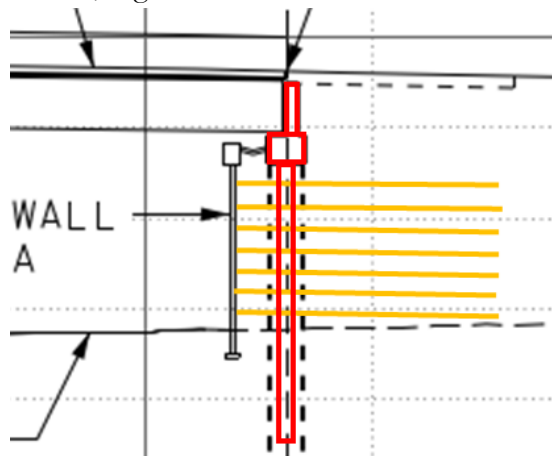


Figura 8. Esquema de la propuesta. En negro se representa el estribo existente y en rojo en nuevo.

TxDOT prefirió la construcción de esta segunda solución debido a que el aspecto final del puente es similar al existente, con poco impacto visual.

Estos micropilotes consisten en una barra de acero de gran diámetro, que se coloca dentro de una camisa también de acero, con la cabeza embebida dentro del cabezal del estribo, llegando la camisa hasta la cota del terreno competente. El espacio entre la barra de acero y la camisa se rellena con lechada (5 ksi).

Las ventajas de esta alternativa, entre otras, son las siguientes:

- No se necesita demoler y reconstruir el muro de tierra armada existente (solo la parte superior para ajustes geométricos y la construcción del cargadero).
- No se requiere excavar detrás de los muros de tierra armada existentes (tan solo en la parte superior para la construcción del cargadero).
- La longitud de los vanos laterales es la misma para todas las vigas, por lo que

las nuevas trabajan de manera similar a las existentes.

- Los detalles estructurales generales del puente son estándar, como los relativos a las nuevas vigas, o a la losa
- El aspecto final del puente ampliado es similar al del existente, lo que no ocurría con la solución anterior y que llevó a descartarla por la propiedad.

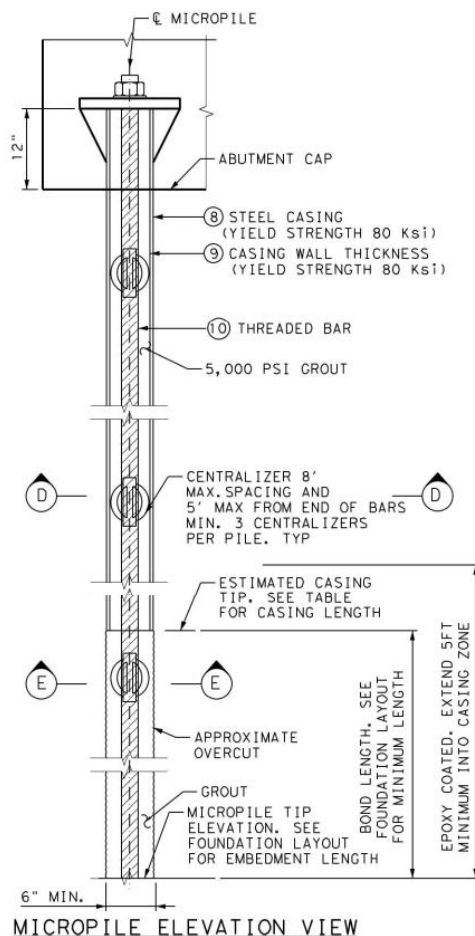


Figura 9. Micropilote empleado en la ampliación de los puentes.

Por otra parte, esta solución tiene algunas desventajas que se sopesaron también antes de su adopción:

- Riesgo de romper algún fleje que no estuviera en su posición prevista.
- Posible sobrecarga del muro de tierra armada existente debido al desplazamiento del terreno.

- Riesgo de vibraciones debido a la maquinaria usada durante el proceso de ejecución de los micropilotes.
- Posibles daños en elementos como geotextiles, tuberías de drenaje, etc.

Al no contar las vigas con voladizo por detrás de los apoyos de estribos, el análisis estructural del tablero en esta solución es más sencillo, pudiéndose recurrir en este a los detalles estándar del Manual de TxDOT. Por ejemplo:

las vigas pueden llevar un pretensado estándar, el uso de paneles de hormigón prefabricado (o “PCPs”) está permitido en todos los espacios entre vigas para la losa (con excepción de aquellos casos en los que se instala una barrera, por ser incompatible con el detalle de anclaje de ésta, y en las zonas donde se instala un sumidero), y las fases de hormigonado no son necesarias, facilitando todo esto la fabricación y construcción de los tableros.

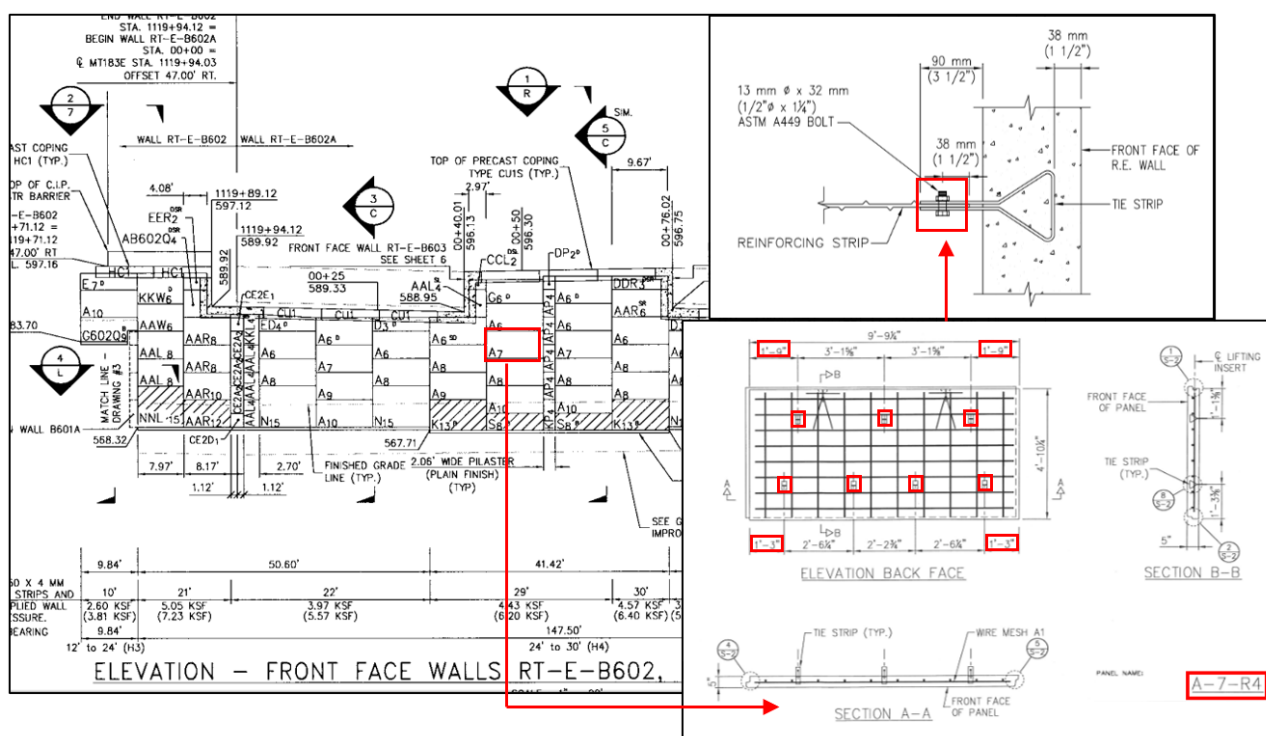


Figura 10. Ejemplo de una escama (A7) del muro construido y sus detalles.

Para poder ubicar correctamente los micropilotes, fue imprescindible en esta solución llevar a cabo un estudio exhaustivo de toda la documentación disponible, como planos “as-builts” y “shop drawings” de los puentes y muros de tierra armada, junto con visitas a campo. Para el posicionamiento de los micropilotes, se previó además un posible margen de desviación de la obra.

A partir de toda esta información, se define para cada uno de los estribos de los puentes la posición exacta de cada uno de los micropilotes, diferente en cada caso. Dada la limitación del espacio, en sentido transversal del puente únicamente es posible colocar dos pares

de micropilotes (uno frontal y uno trasero) en la mayoría de los casos. En general, la localización de estos micropilotes se sitúa en la junta vertical entre paneles del muro de tierra armada (“MSE”) dado que en estas no hay flejes.

Los cargaderos existentes disponían de acopladores, preparados para conectar las armaduras principales a la prolongación de los nuevos cargaderos. Sin embargo, éstos no han sido aprovechados, dejándose un hueco de 1” entre el cargadero existente y la ampliación, para lo que ha hecho falta impermeabilizar la zona para evitar problemas de filtraciones de agua.

La razón de no unir los cargaderos de la ampliación a los existentes es que aparecen

esfuerzos excesivos en éstos y en sus pilotes si ambos elementos se hacen solidarios.

En algunos casos, se plantea la demolición de parte del estribo existente (mediante hidrodemolición para la posterior reconstrucción de parte del cargadero existente, asegurando la longitud de anclaje de las barras existentes) puesto que la única localización posible para los nuevos micropilotes queda excesivamente cerca de este, siendo imposible la perforación del terreno para la instalación de la camisa sin dañarlo.

El diseño inicial de los micropilotes se hizo considerándolos “tipo B” según la clasificación de la “Federal Highway Administration” (FHWA) (lechada inyectada a presión a través de la camisa) aunque posteriormente se actualiza a “tipo A” (lechada vertida por gravedad) debido a limitaciones en el espacio necesario por la maquinaria especializada.

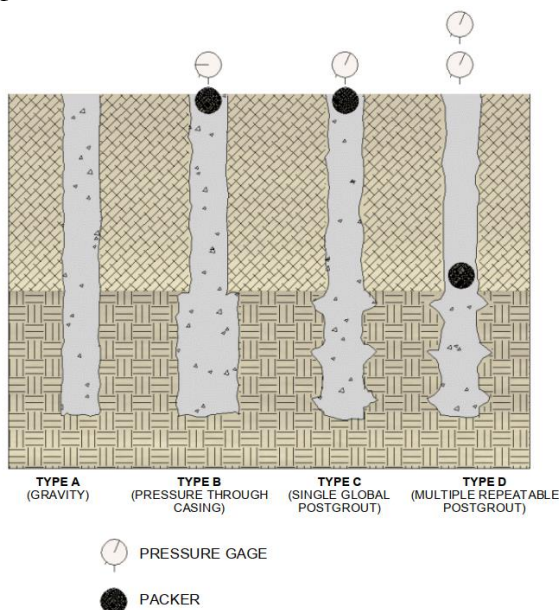


Figura 11. Tipos de micropilotes según el sistema usado para el relleno con lechada (FHWA)

La comprobación de los micropilotes se ha hecho tanto según la FHWA, que sigue el método ASD (“Allowable Stress Design”), analizándose los micropilotes en servicio, como según la AASHTO, que sigue el método LRFD (“Load and Resistance Factor Design”), haciéndose las comprobaciones en estado límite

último. Para cada micropilote, se han estudiado tres zonas distintas:

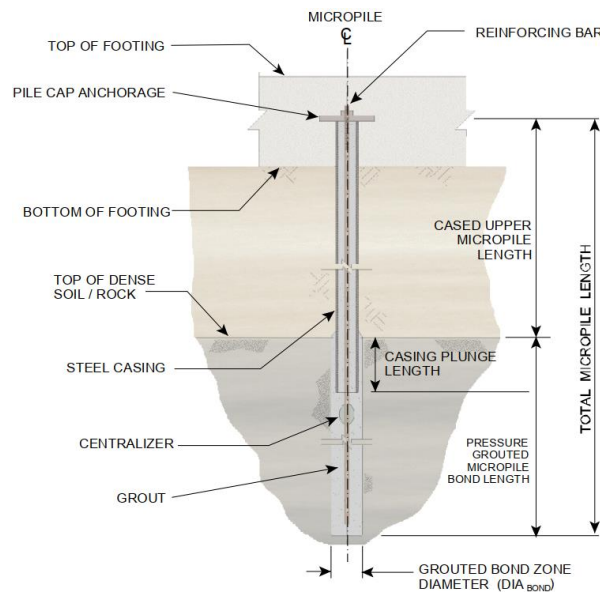


Figura 12. Distintas zonas del micropilote (Figura 5-1 de la FHWA)

- Longitud en la zona del muro (desde la cabeza del micropilote hasta la cota de la base del muro). Se ha considerado que no hay corrosión en esta zona debido a las características del relleno tras el muro. En esta longitud el micropilote cuenta con camisa.
- Longitud desde la cota de la base del muro hasta la cota del estrato resistente. Se ha considerado que en esta zona sí puede haber corrosión y se ha analizado los micropilotes considerando la sección reducida (una pérdida de 0.063 in – 1.6 mm-, de acuerdo con las recomendaciones de la FHWA – Tabla 5-6). En esta longitud el micropilote cuenta con camisa.
- Longitud en el estrato resistente. La sección del micropilote únicamente cuenta con la barra interior y la lechada. La barra interior en esta zona cuenta con un recubrimiento de pintura epoxi que debe ampliarse un mínimo de 5 ft (1,53 m) en la zona con camisa. No se considera el uso de camisa en esta zona.

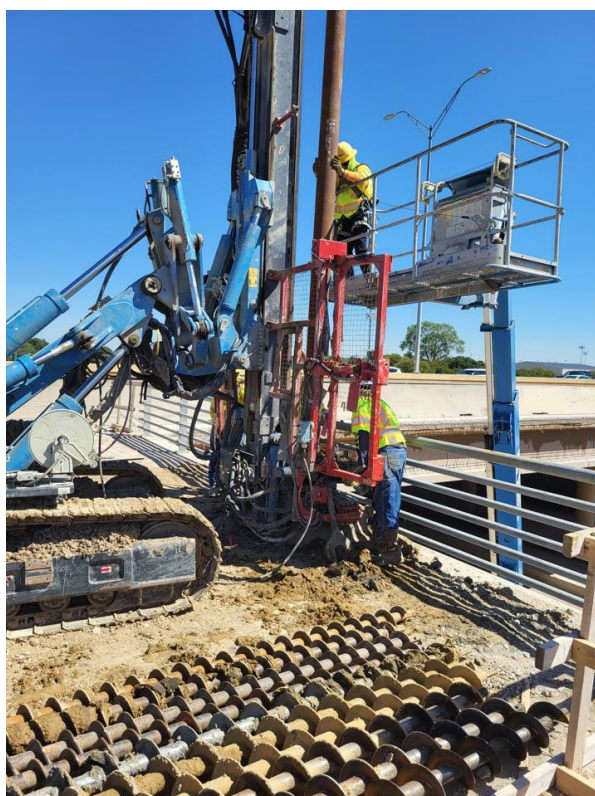


Figura 13. Construcción de los micropilotes

El tipo de unión permitida para los distintos tramos de camisa varía:

- No se permite ningún tipo de junta en los primeros 10 ft (3,05 m).
- Entre los primeros 10 ft (3,05 m) y 10 ft por debajo de la base del muro, se ha estudiado y especificado en cada caso según los esfuerzos a los que está sometido cada micropilote el tipo de unión a usar. En algunos casos, sólo se permite unión soldada, en otros, se deja a elección del constructor el uso de unión soldada o machihembrada.
- De los 10 ft (3,05 m) por debajo de la base del muro a la base de la camisa/a la cota superior del estrato resistente, se permite la unión machihembrada en todos los casos, dejando a la elección del constructor el tipo de junta a usar.

De manera previa a la construcción de los micropilotes, se han realizado las pruebas especificadas por el TxDOT y recomendadas por la FHWA estadounidense, permitiendo el TxDOT mediante la aprobación de una “Design

Deviation” la comprobación de un solo micropilote en únicamente un estribo de dos de los cruces (cuatro estructuras en total) en vez de un micropilote por subestructura como indica en sus “Special Specifications”.

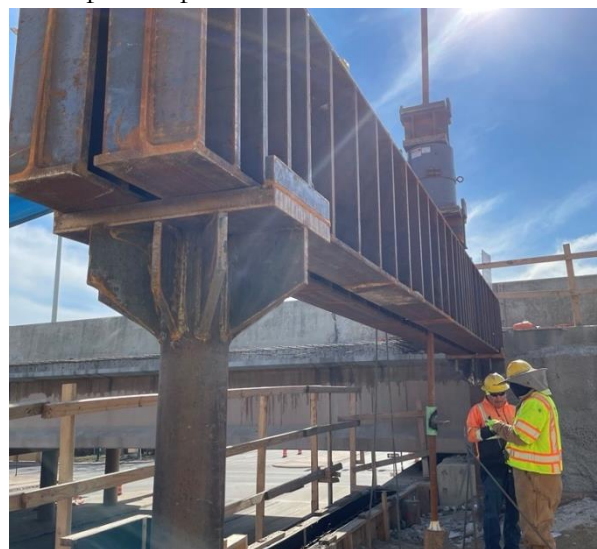


Figura 14. Ensayo a tracción - “Verification Test”

El tipo de ensayo que se ha realizado en todos los casos es el llamado “Verification Test”: un ensayo a tracción en que se aplica dos veces el axil de diseño en servicio al micropilote de prueba que se está comprobando.

Agradecimientos

La construcción del tramo 2W de la NTE está siendo ejecutada por Ferrovial. El diseño de las estructuras lo ha realizado WSP Spain – APIA, en coordinación con el equipo de diseño de Ferrovial, liderado por David Maestro, fruto de un productivo trabajo en equipo con sus especialistas estructurales Paul Vizenor, Ignacio Embid y Jesús Fernández de Bobadilla.

Referencias

- [1] AASHTO LRFD, 8th Edition, 2017, with all interim specifications, AASHTO, EEUU.
- [2] TxDOT LRFD, Bridge Design Manual, July 2018, TxDOT, EEUU.
- [3] Micropile Design and Construction, 2005, FHWA, EEUU.