

Metro de Málaga. Actuaciones singulares en tramos Renfe-Guadalmedina y Guadalmedina-Atarazanas.

Malaga underground. Singular actions on Renfe-Guadalmedina and Guadalmedina-Atarazanas sections

**Alejandro Castillo Linares^a, Guillermo Montero Poyatos^b, David Trujillo Montes^c,
Mario García Ramírez^d, Eduardo Caroselli Blanco^e, Eduardo López Sánchez^f**

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Granada (Granada, España). A.C.L. Diseño y Cálculo de Estructuras S.L. (Cádiz, España).

Director Gerente. acastillo@acl-estructuras.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. A.C.L. Diseño y Cálculo de Estructuras S.L. (Cádiz, España). Director de proyectos.

gmontero@acl-estructuras.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. A.C.L. Diseño y Cálculo de Estructuras S.L. (Cádiz, España). Director de proyectos.

dtrujillo@acl-estructuras.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía (Málaga, España). Director de obra.

mario.garcia@aopandalucia.es

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sando Construcciones (Málaga, España). Gerente de obra. ecaroselli@sando.com

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona (Málaga-Sevilla, España). Jefe de obra. eduardo.lopez.sanchez@acciona.com

RESUMEN

En el último lustro, se han acabado y abierto al tráfico los tramos del Metro de Málaga Renfe-Guadalmedina y Guadalmedina-Atarazanas. Durante su construcción, fue necesario realizar en fase de obra diversos ajustes respecto al proyecto de construcción debido, entre otros, a la importancia de los restos arqueológicos encontrados y los servicios afectados de la ciudad. En este artículo se describen las soluciones proyectadas y singularidades constructivas para dos actuaciones particulares: el sostenimiento de los restos arqueológicos de la Muralla Nazarí y la construcción de la infraestructura del Metro bajo un puente existente sobre el río Guadalmedina.

ABSTRACT

Over the last five years, the sections Renfe-Guadalmedina and Guadalmedina-Atarazanas of the Malaga underground have been completed and opened to service. During its construction, it was necessary to implement various adjustments to the construction project due to, among others, the importance of the archaeological remains found, and the city affected services. This article describes the projected solutions and constructive singularities for two particular civil works: the support of the archaeological remains of the Nasrid Wall and the construction of the subway infrastructure under an existing bridge over the Guadalmedina River.

PALABRAS CLAVE: Metro, puente, muro descendente, proyecto, construcción singular, muralla Nazarí.

KEYWORDS: Underground, bridge, descending wall, project, special construction, Nasrid wall.

1. Introducción

La construcción de los primeros tramos licitados por la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía de las Líneas 1 y 2 del Metro de Málaga comenzó en junio del año 2006. Desde entonces, a medida que se han finalizado los tramos han sido puestos en servicio para mejorar progresivamente las condiciones de accesibilidad y vertebración de la ciudad.

En el último lustro, se han acabado y puestos en funcionamiento los tramos Renfe-Guadalmedina y Guadalmedina-Atarazanas, en los que ACL Estructuras ha participado como asesor y proyectista en materia de estructuras en el desarrollo de los proyectos y construcción de ambos tramos. En concreto, la ejecución de la infraestructura completa concluyó en enero de 2022 y, tras el montaje de vía y realización de las pruebas dinámicas y de seguridad de instalaciones, los tramos fueron abiertos al tráfico a finales de marzo de 2023.



Figura 1 Esquema de líneas del Metro de Málaga.

El paso de una obra subterránea de este tipo por el centro de cualquier ciudad, y en particular una con tanta historia, conlleva la realización una amplia actividad arqueológica y sobre servicios e infraestructuras afectadas. Esto supuso la inclusión en los proyectos de distintas soluciones constructivas y estructurales singulares, algunas de las cuales se describirán en el presente artículo.

2. Breve descripción de la infraestructura de los dos tramos

Los dos últimos tramos construidos, Renfe-Guadalmedina y Guadalmedina-Atarazanas, discurren en su totalidad bajo tierra. El primero de ellos se desarrolla en una longitud total ligeramente superior a 700 m y el segundo en los 333 m restantes hasta la Estación de Atarazanas, emplazada dentro del Paseo de la Alameda Principal de Málaga.

El primero de los tramos está dividido en tres secciones, la central que corresponde a la Estación de Guadalmedina y los extremos que se designan como Túnel. Cuenta con un total de tres niveles bajo superficie, correspondientes con el vestíbulo y/o losa arriostrante, andén -1 y andén -2. De esta forma, se llega hasta profundidades máximas de excavación bajo terreno natural de hasta 21 m y una anchura máxima libre entre pantallas de 20 m. Las pantallas tienen longitudes medias de 28.5 m, y quedan empotradas en las margas sanas.

A la altura del p.k. 0+560 del tramo, se conocía de la existencia de restos de una muralla nazarí que cruzaba aproximadamente ortogonal a la traza y se encuentra moderadamente superficial. Estos restos debían ser respetados al estar catalogados como Bien de Interés Cultural (BIC). Posteriormente, en fase de obra, se descubrió que la anchura de la muralla era superior a la prevista en proyecto, y se planteó incluso ponerlos en valor haciéndolos visitables. Para todo ello, fue necesario el diseño de una solución singular de sustentación con procedimientos constructivos especiales.



Figura 2 Imagen ilustrativa de restos de la muralla nazarí encontrados en Callejos del Perchel.

El segundo de los tramos, que fue el primero en finalizarse de los dos, tiene también tres niveles bajo superficie, correspondientes al vestíbulo, andén del metro y futura línea de cercanías del ferrocarril. Esta última sólo se contempla a nivel de proyecto, no habiéndose realizado las excavaciones necesarias a tal efecto en la obra del Metro. La anchura de este tramo entre pantallas es más limitada, comprendida entre 12.9 m en la conexión al tramo anterior y 8.5 m en el final. El tramo inicial discurre bajo la Avenida de Andalucía que, para llegar al Paseo de la Alameda, cruza sobre el río Guadalmedina mediante el Puente de Tetuán.



Figura 3 Antiguo Puente Tetuán bajo el que cruza la línea de Metro.

Para ejecutar la obra subterránea, el proyecto prevé la demolición en toda su longitud aproximadamente la mitad de anchura del puente (tablero, pilas y estribos), para posteriormente ser reconstruida sobre la infraestructura del Metro. Así, las pilas y estribos del nuevo puente nacen sobre la losa de cubierta y pantallas, lo que constituye una singularidad tanto de dimensionamiento estructural como constructiva.

3. Sostenimiento de la Muralla Nazarí en Callejos del Perchel

3.1 Descripción de la solución proyectada

3.1.1. Introducción

Los restos de la muralla cruzan de forma aproximadamente ortogonal a la traza del Metro y ocupan una anchura máxima de aproximadamente 10 m, según se pudo constatar con los primeros trabajos de excavación. La

anchura de la muralla, en la confluencia con las pantallas de ambos márgenes, quedaba reducida a 4.0 m de valor medio. En esta zona, más cierto margen de seguridad, no fue posible dar continuidad a las pantallas, ya que los bataches los restos arqueológicos. Paralelas a la muralla, se realizaron también otras pantallas para la contención lateral provisional, que posteriormente fueron demolidas en los niveles inferiores.

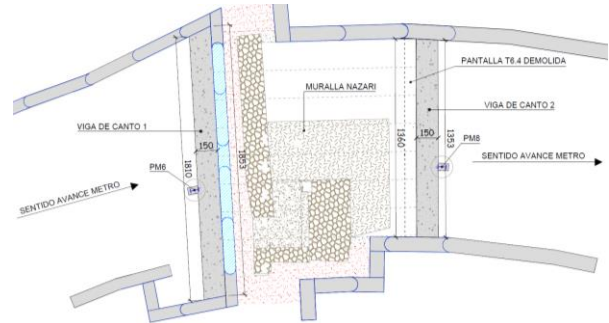


Figura 4 Vista en planta de pantallas y posición prevista de muralla en proyecto.

3.1.2. Sustentación de la muralla

La solución proyectada para sustentar la muralla consistió en la ejecución de un cajón descolgado del dintel de cubierta con sección en U, formado por sendas vigas de canto hormigonadas contra las pantallas transversales provisionales y una losa inferior para cerrar la sección resistente en U, que se ejecutó mediante un laborioso sistema de excavación y hormigonado por bataches al amparo de un paraguas de micropilotes horizontales.

Una vez se excava entre las pantallas, se construyen las dos vigas de canto laterales, una de ellas con canto variable para que la muralla quedase visible. Las vigas quedan provisionalmente apeadas con unos perfiles-pilote, acorde con la definición prevista en proyecto original.

La viga de canto nº 2 se construye con canto variable, rebajado en la zona central, para que los restos de la muralla queden visibles desde la losa arriostrante intermedia del interior del túnel.



Figura 5 Viga de canto variable en una de las márgenes.

A continuación, se ejecuta un paraguas de micropilotes horizontales con un resguardo de terreno natural de 40 cm de espesor hasta la base de la muralla, situada a 5.0 m de profundidad bajo la calle. Los micropilotes se distribuyen al tresbolillo en 2 filas en una altura de 90 cm, cada una de ellas formada por 17 micros de 180 mm de diámetro separados 80 cm entre sí. El paraguas de micropilotes forma parte del sistema de contención provisional del terreno, durante las labores de excavación en mina a ejecutar por debajo de la muralla.



Figura 6 Ejecución de los micropilotes bajo cerchas de apuntalamiento entre pantallas.

Bajo el paraguas de micropilotes se establecieron un total de 7 vigas longitudinales de hormigón armado, cada una de ellas de cerca de 2.0 metros de anchura y 1.7 metros de canto. El armado principal a flexión de las mismas está formado principalmente por 6 perfiles laminados HEB-140, que se disponen en toda la longitud y se empotran 1 metro en las vigas de canto. El empotramiento es necesario para asegurar la correcta transmisión de esfuerzos entre la biela inclinada en apoyos y el cordón inferior traccionado. Además, se dispone la correspondiente armadura de cortante. Las uniones entre vigas se establecen con acabado machiembrado en las paredes verticales.

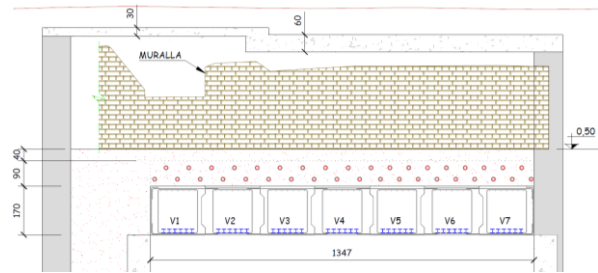


Figura 7 Sección transversal al Metro en zona de muralla.

Además de los restos de muralla anteriores, se localizaron muchos otros bajo la Avenida de Andalucía, incluida otra parte de la muralla Arrabal Attabanim, para la que se proyectó un sistema de sustentación similar, pero a menor escala. Los restos arqueológicos encontrados en la traza serán conservados y expuestos próximamente en un museo localizado sobre la losa arriostrante de nivel -1, junto al tramo de muralla bajo la Avenida de Andalucía.



Figura 8 Imagen ilustrativa de restos de la muralla y estructura de apeo bajo Avenida de Andalucía.

3.1.3. Sostenimiento del terreno bajo la muralla

Tal como se ha visto anteriormente, las pantallas longitudinales a la traza quedaron interrumpidas para dar paso a la muralla. Desde la base del cajón hasta la cota de excavación final para el andén -2 del Metro, queda una altura de aproximadamente 12.0 m en la que es necesario contener el terreno y agua freática sin pantallas.

La solución proyectada para ello fue la ejecución de un muro descendente construido por bataches horizontales, dispuesto a partir de la cota de las vigas de sostenimiento de la muralla, auxiliado con una losa de cierre y pantallas de micropilotes.

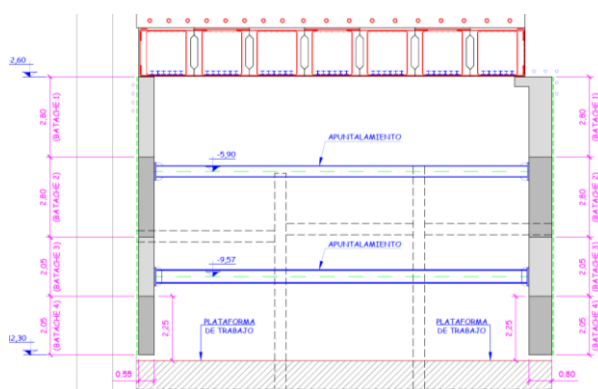


Figura 9 Sección transversal de muros descendentes.

Los muros tienen 55 cm de espesor en una margen y 80 cm en la otra. Quedan anclados lateralmente a las pantallas y apuntalados entre sí. En la margen izquierda, el muro cubre sólo la anchura que quedó libre entre pantallas, de 3.66 m. En la margen derecha se decidió, por razones constructivas y proximidad de edificaciones, realizar el muro alineado con las pantallas de esta margen, en lugar de cerrar más atrás en el recinto libre de pantallas de menor anchura. Por ello, se requiere un muro de mayor longitud y, en consecuencia, de más espesor.

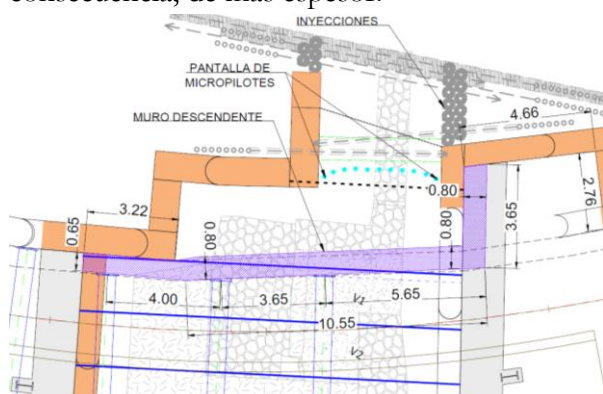


Figura 10 Planta de muro descendente de margen derecha envolviendo el contorno de las pantallas.

3.2 Singularidades del procedimiento constructivo

A continuación, se describen los aspectos más singulares de la construcción.

Para la ejecución de la losa inferior del cajón, tras construirse las vigas de canto hormigonadas contra las pantallas provisionales y ejecutarse el paraguas de micropilotes, se siguió el siguiente procedimiento:

- Realización de excavación al abrigo del paraguas de micropilotes, en bataches de 2.0 m de anchura y 1.7 metros de altura, disponiendo a tal efecto marcos de sostenimiento conforme se avanzaba en la excavación a separaciones no superiores a 1 metro. Los marcos de sostenimiento estaban formados por perfiles metálicos, unidos entre sí con tornillos unidos en los hastiales mediante tornillos. La ejecución de las excavaciones se realizó de forma manual, empleando técnicas propias de la minería.



Figura 11 Ilustración de excavación para viga.

- Una vez completada la excavación, se ferralla y hormigona cada viga longitudinal. El hormigonado quedaba delimitado en ambos extremos por encofrados verticales dispuestos a nivel de los paramentos interiores de las vigas exteriores de canto.
- La secuencia constructiva de las vigas consistió en ejecutar en primera fase las impares sin hacer coincidir más de dos al mismo tiempo, y en segunda las resultantes intermedias.

Respecto a los muros descendentes, en una primera fase se ejecutaron pantallas de micropilotes e inyecciones de consolidación del terreno en el trasdós de la posición de los muros, principalmente para contener la entrada de agua al túnel y estabilizar el terreno durante las excavaciones de los bataches, debido a la cercanía de las edificaciones.

En paralelo, se habilitan en el interior del túnel las plataformas de trabajo a cada lado para dejar libre una anchura central de paso de maquinaria de obra. Una vez esto, se realiza la excavación de cada altura de bataches y la retirada y estabilización provisional del terreno.



Figura 12 Estado de excavación inicial.

Una vez retirado y estabilizado el terreno, se ferralla y hormigona cada uno de los bataches, empleando encofrado a una cara apuntalado contra el terreno o la losa inferior de sostenimiento de la muralla.



Figura 13 Ferrallado de muro de margen derecha.

Para proseguir la excavación del siguiente batache, se colocaron los correspondientes puntales entre ambas márgenes, que se retiraron cuando se completó la ejecución de la losa de fondo, los muros intermedios y losas interiores.



Figura 14 Apuntalamiento de los muros.

4. Puente Tetuán sobre el río Guadalmedina

4.1 Descripción de la estructura

El puente de Tetuán materializa el paso de la Avenida de Andalucía sobre el cauce del río Guadalmedina, así como sobre dos calles dispuestas paralelamente al río.

Posee una anchura total de unos 47.3 metros, que se repartían originariamente en dos aceras laterales de unos 7.0 metros de anchura y dos calzadas de 14.8 metros, separadas por una mediana ajardinada central. Longitudinalmente cuenta con 4 vanos de luces de $17.2+22.3+22.3+17.2$ m, los cuales son independientes entre sí, ya que se disponen juntas de dilatación entre ellos (tanto en los estribos como en las pilas). El puente cruza sobre el cauce del río con un esviaje medio de 12° y las pilas y estribos están dispuestas sensiblemente paralelas al río.

Para ejecutar las pantallas del Metro, se demolió inicialmente aproximadamente la mitad de anchura del puente (tablero, pilas y estribos), que después tienen que ser reconstruidas dentro del ámbito de actuación del proyecto.

La sección transversal del tablero a reconstruir tiene una anchura media de 24.5 m en los vanos 1 y 2, y de 23.6 m en los vanos 3 y 4. Para ello se prevén 20 vigas doble T de 0.9 m de canto en los dos primeros vanos, separadas entre ejes 1.21 m, y 19 vigas de igual canto en los dos últimos, con separación entre ejes de 1.23 m. Sobre ellas se dispone losa superior hormigonada in situ sobre prelosas, con espesor mínimo de 20 cm (losa + prelosa). El tablero de reposición mantiene la misma distribución de juntas de calzada sobre pilas y estribos original, y está conectado al existente a nivel de la losa de compresión con unión rotulada mediante barras ancladas en perforaciones rellenas con resina epoxi.

Las pilas y estribos se disponen ligeramente esviados respecto al eje de trazado

del puente, siguiendo la dirección del cauce del río, y en ambos casos son independientes de las actuales a efectos de comportamiento estructural.

En las pilas se intenta reproducir la misma geometría de las existentes (parte no demolida), por lo que se disponen pilas tipo tabique de 90 cm de canto longitudinal en pilas 1 y 3, mientras que la pila 2 resulta formada por 4 fustes de sección octogonal, más un dintel superior entre todos ellos para habilitar el apoyo de las vigas del tablero. De este modo, las pilas funcionan además de como elementos soporte del tablero del puente, como vigas de canto del dintel de cubierta del metro.

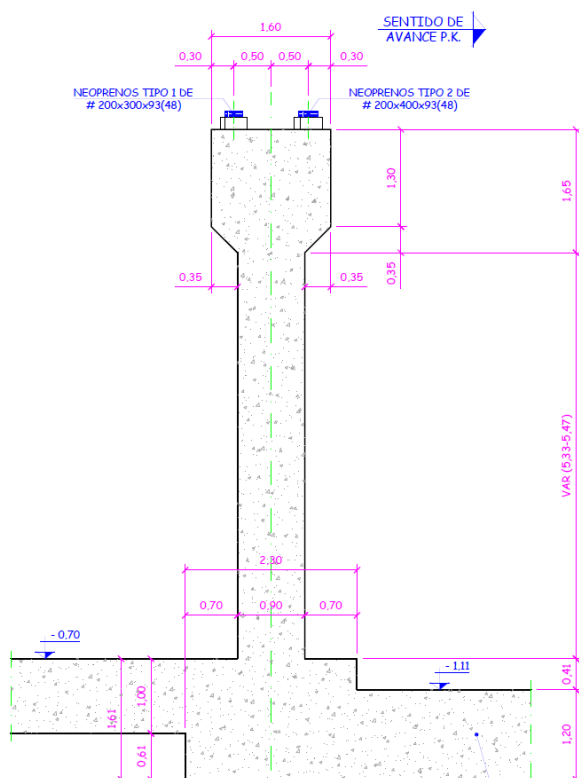


Figura 15 Sección longitudinal de pila 1.

Puesto que la anchura del tablero es superior a la anchura del túnel del Metro en la posición de las pilas (15.5 m contando con el espesor de la pantalla), parte del alzado de las pilas queda dentro de la sombra del túnel, pero la restante es exterior. Por ello, la cimentación resultante es mixta: parte sobre la estructura del túnel y otra con cimentación exterior independiente.

La longitud de las pilas 1 y 3 en dirección esviada es de 24.3 y 23.75 m respectivamente. En 4 m situados junto al apoyo en las pantallas del túnel, el canto del tabique se incrementa desde 90 a 230 cm para resistir y transmitir los esfuerzos locales que se presentan en la conexión a las pantallas, además de habilitar la superficie mínima necesaria de apoyo de la pila sobre la pantalla a una cota elevada respecto a la del dintel. Además del apoyo directo en las pantallas, se realiza conexión con barras ancladas con resina epoxi que, en la anchura del capitel inferior, que permiten materializar la condición de empotramiento de la pila en la pantalla.

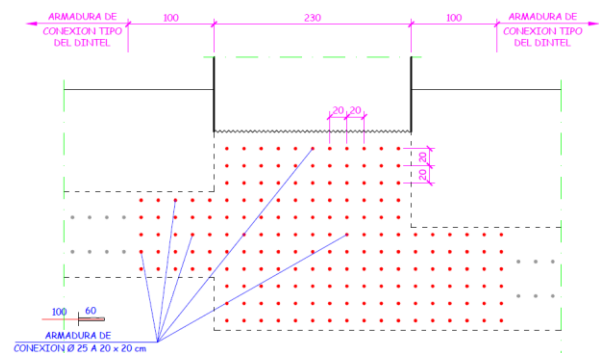


Figura 16 Refuerzo de conexión de armadura a pantallas en empotramiento de pilas.

La pila 2 dispone un dintel corrido que une entre sí los 4 fustes, con geometría similar al capitel de las anteriores, y con una longitud de 24.25 m.

Respecto a los estribos, ambos están constituidos por un muro frontal de 1.10 m de canto, cuya altura sobre el dintel de cubierta varía entre 6.2 y 7.0 m aproximadamente. El muro frontal se prolonga en la zona superior en el espaldón, de espesor variable entre 35 y 65 cm. Los estribos se completan con la disposición de losa de transición.

El estribo 2 queda prácticamente en toda su anchura (24.54 m) apoyado sobre el dintel de cubierta y pantallas del túnel.

En el estribo 1, debido a que el túnel es más estrecho en esta zona, parte del mismo se sitúa fuera de la sombra del túnel, como ocurre en las pilas. En la zona exterior al túnel, se aprovechan 6.0 m del estribo primitivo no

demolido, que tiene que ser reforzado para el cumplimiento de la actual normativa. Se dispone para ello un muro forro exterior de 50 cm de espesor hasta 3.2 m de altura por encima de la cota del encepado actual, que se conecta con armadura al muro existente y se prolonga en sendos dados-encepados hasta dos pilotes dispuestos en la puntera del encepado existente

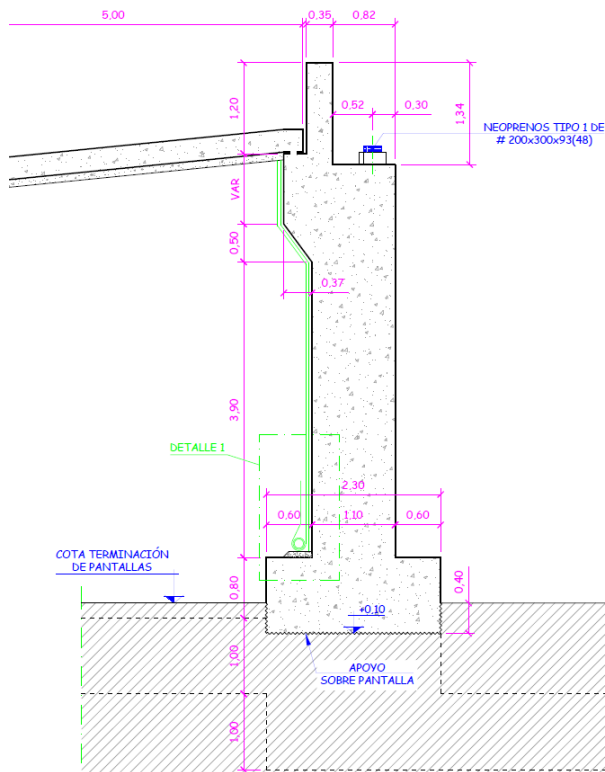


Figura 17 Sección de estribo de nueva construcción.

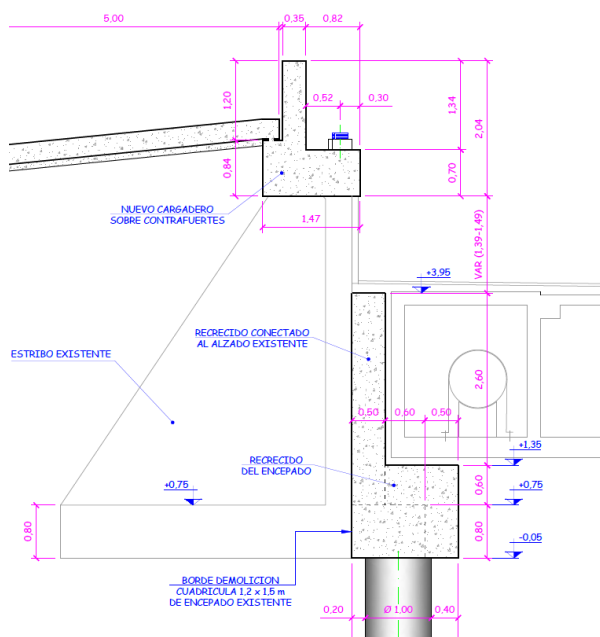


Figura 18 Sección de estribo existente reforzado

El apoyo de los estribos y pilas sobre las pantallas del túnel se establece mediante pernos conectadores con objeto de minimizar el volumen de descabezado de las pantallas y la entrada de agua freática a la zona de trabajo. No obstante, las pilas y estribos quedan también apoyadas de forma directa sobre las pantallas en una longitud mínima de 2.3 m.

El apoyo de las vigas del tablero sobre pilas y estribos se realiza a través de neoprenos dotados de pernos para anclaje a la subestructura, cuyas dimensiones son de 200x300x93 (48) mm en los vanos 1 y 4, y de 200x400x93 (48) mm en vanos 2 y 3.

4.2 Procedimiento constructivo

La primera fase constructiva, para poder ejecutar las pantallas del Metro, se centró en la demolición del tablero, pilas y estribos de la anchura requerida.



Figura 19 Trabajos de demolición del tablero.

A continuación, se construyeron las pantallas por tramos, dejando al menos un vano libre bajo el puente para el paso de agua del río.

Los bataches de pantalla situados alrededor del del apoyo de las pilas y estribos, tienen una longitud mayor que el resto por criterio de hundimiento geotécnico, ya que reciben las cargas transmitidas desde el puente. En estos casos, se requirió un mayor empotramiento en el sustrato de marga y el empleo de elementos auxiliares para poder perforarla.

Durante esta fase se trabajó también en la ejecución de la parte de cimentación que queda

exterior al túnel, en algunos casos aprovechando y reforzando las cimentaciones existentes, y en otros mediante la construcción de nuevos pilotes y bataches de pantalla como elemento de cimentación.



Figura 20 Vista aérea de comienzo de trabajos para túnel de Metro tras demolición de puente.

Posteriormente, se construyó la losa de cubierta del túnel, que está conectada a las pantallas con barras ancladas con resina epoxi, cuya cuantía se refuerza alrededor del apoyo de las pilas y estribos. En estas zonas hubo que tomar precauciones especiales para no cortar las armaduras de la pantalla con las perforaciones, y rellenar con mortero de alta resistencia aquellas perforaciones fallidas en las que se localizaban barras de armadura de las pantallas.



Figura 21 Ferrallado de losa de cubierta, esperas de pilas y refuerzos locales en conexión a pantallas.

Una vez se completaron los alzados de las pilas y estribos, el procedimiento constructivo seguido fue el habitual en este tipo de estructuras: colocación de las vigas del tablero con grúa, colocación de armaduras de conexión a losa de tablero existente, ferrallado y

hormigonado de losa de compresión, acabados de la superestructura y prueba de carga.



Figura 22 Colocación de vigas del tablero.

Referencias

- [1] Carlos Oteo Mazo, José María Rodríguez Ortiz, Felipe Mendaña Saavedra (2003), *Sobre los sistemas y parámetros geotécnicos de diseño en ampliación del Metro de Madrid*, Revista de Obras Públicas.
- [2] Carlos Oteo Mazo, Juan de Dios Moreno Jiménez, Pedro Arozamena Cagigal (2009), *Problemas geotécnicos en la Línea 1 del Metro de Sevilla*, Revista de Obras Públicas.
- [3] Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (2005), *Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera*, Series normativas. Instrucciones de construcción.
- [4] Departamento de infraestructuras de la Agencia de obra pública de la Junta de Andalucía (2021). *Presencia de estructuras arqueológicas en la ejecución de las obras del metro de Málaga: incidencia y soluciones constructivas adoptadas*. Madrid, European and Underground Tunnel Forum EUTF.