

Una excavación profunda en un contexto geológico-geotécnico complejo y muy heterogéneo

14

Proyecto modificado de contención de tierras en la estación Plaza de la Bandera de la Línea 3 de metro en Guadalajara (Méjico)

Manuel de Cabo,
Subterra Ingeniería

Roberto Jiménez,
Subterra Ingeniería

Daniel Santos,
Subterra Ingeniería

inGEOpres

En el presente artículo se exponen los principales aspectos de diseño y ejecución de la solución particular de contención de tierras desarrollada para la Estación Bandera dentro del Proyecto de la Línea 3 de Metro Ligero en Guadalajara. La construcción del proyecto del túnel ha sido realizada por un Consorcio formado por el Grupo Sacyr, la portuguesa Mota Engil y las mejicanas Grupo Promotor de Desarrollo e Infraestructura y Trena. Subterra Ingeniería ha desarrollado para la constructora la asesoría geotécnica y estructural de las obras subterráneas del proyecto.

1.- Introducción

El Consorcio formado por el Grupo Sacyr, la portuguesa Mota Engil y las mejicanas Grupo Promotor de Desarrollo e Infraestructura y Trena ha desarrollado la construcción de la nueva Línea 3 de Metro Ligero en Guadalajara, capital del estado de Jalisco (Méjico).

Actualmente se prevé que la línea será puesta en servicio a principios de 2019 y se estima que transportará a 233.000 pasajeros diariamente.

La Línea 3 del Tren Ligero de Guadalajara será la tercera línea ferroviaria de transporte público en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Esta línea conectará el centro histórico de Guadalajara con los municipios del extrarradio de Zapopán y Tlaquepaque. Este proyecto implica la construcción de una línea de metro de 22 km de longitud que dispone de 18 estaciones, de las cuales 13 serán elevadas y 5 serán subterráneas. El Proyecto Ejecutivo ha sido realizado por Sener.

Una de las estaciones subterráneas es la estación de Plaza de la Bandera, ubicada en un entorno urbano densamente ocupado. El proyecto constructivo de esta estación contemplaba la ejecución de muros pantalla acodalados en varios niveles de losas de la estructura definitiva de la estación. El Consorcio Constructor encargó a Subterra Ingeniería el análisis de una solución optimizada para la resolución de la contención de tierras teniendo en cuenta el contexto geotécnico del emplazamiento.

En el presente artículo se exponen los principales aspectos de diseño de la solución particular de contención de tierras desarrollada y se describen los principales datos respecto a la fase de ejecución.



Figura 1.- Ubicación del proyecto.



Figura 2.- Mapa de la Línea 3 de metro de Guadalajara (Méjico).



Figura 3.- Planta de implantación de la estación Bandera (Fuente: Proyecto ejecutivo).

2.- Descripción del proyecto de la estación

La configuración arquitectónica de la Estación Plaza de la Bandera se estructura en base a un gran paralelepípedo subterráneo de dimensiones interiores: 108 m de longitud, 19 m de anchura y 20 m de profundidad. La cota máxima de excavación se sitúa a 27,5 m de profundidad.

Este paralelepípedo se subdivide en tres volúmenes que ocupan toda la anchura de la caja de la estación y que van desde el nivel de andén hasta la losa de cubierta: un gran espacio central que contiene todos los elementos de uso público (andenes, escaleras y ascensores y vestíbulo) y dos bloques de locales técnicos ubicados en ambas cabeceras.

La distribución de espacios se organiza en torno a cuatro niveles como son el nivel de andén, distribuidor, intermedio y vestíbulo.

El acceso de viajeros se efectúa desde los laterales y a la cota del nivel de vestíbulo.

El nivel de andén se apoya directamente contra el terreno. El nivel distribuidor se apoya en pilares que cimentan sobre el nivel de andén. Los niveles de losas intermedio y de losa de cubierta se sustentan en las alineaciones de contención laterales y se dimensionan para una luz equivalente a la anchura de la estación.

El Proyecto Ejecutivo preveía un proceso constructivo de arriba hacia abajo, con objeto de minimizar el periodo de afecciones al tráfico viario. En este proceso primeramente se construirían los muros pantalla y seguidamente se realizaría una pequeña excavación necesaria para la construcción de la losa de cubierta. La ejecución de la cubierta posibilita la reposición de la circulación viaria sobre el área de la estación.

El proceso de construcción continuará realizando el resto de la excavación en falso túnel. De esta manera se van construyendo los diversos niveles de losas, que van apoyadas en las pantallas perimetrales, colando el hormigón contra el terreno a medida que se va bajando de cota de excavación.

En el caso del nivel distribuidor, dado que las losas de este nivel solamente se podrán ejecutar después del paso de la tuneladora por la estación, se previó un diseño mediante pilares y puesta en obra cimbrada.

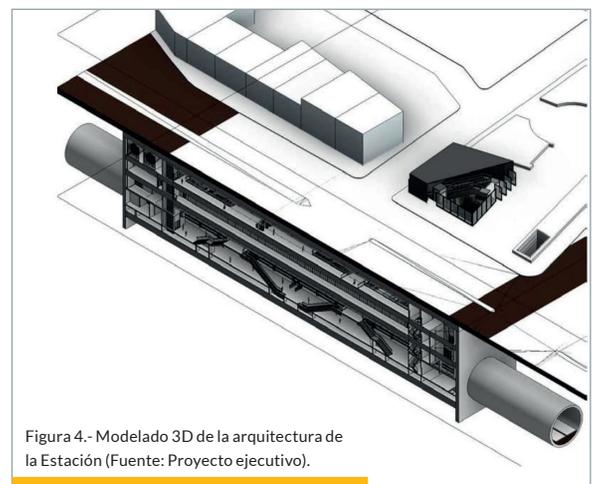


Figura 4.- Modelado 3D de la arquitectura de la Estación (Fuente: Proyecto ejecutivo).

3.- Encuadre geológico-geotécnico

La Zona Metropolitana de Guadalajara se engloba en la denominada Región Central del estado donde se alternan bloques de montañas volcánicas, valles y llanos de escasa extensión y de amplias depresiones o fosas tectónicas ocupadas por lagos y lagunas.

El Área Metropolitana se encuentra asentada en el altiplano denominado 'Valle de Atemajac', conformado por una serie de depósitos plinianos originados por la actividad volcánica de la Sierra de la Primavera, los cuales han sido alterados por secuencias erosivas fluviales y lacustres originadas en las etapas de reposo de las actividad volcánica de las estructuras que rodean a la ciudad.

A escala local, la geología del entorno de la Zona Metropolitana de Guadalajara está dominada por depósitos vulcanosedimentarios cuaternarios de toba riolítica, depositados de manera discordante sobre diversos episodios de coladas basálticas y flujos piroclásticos que dieron lugar a depósitos ignimbríticos.

Respecto a la hidrogeología, en líneas generales se detectó la presencia de dos tipos de acuíferos:

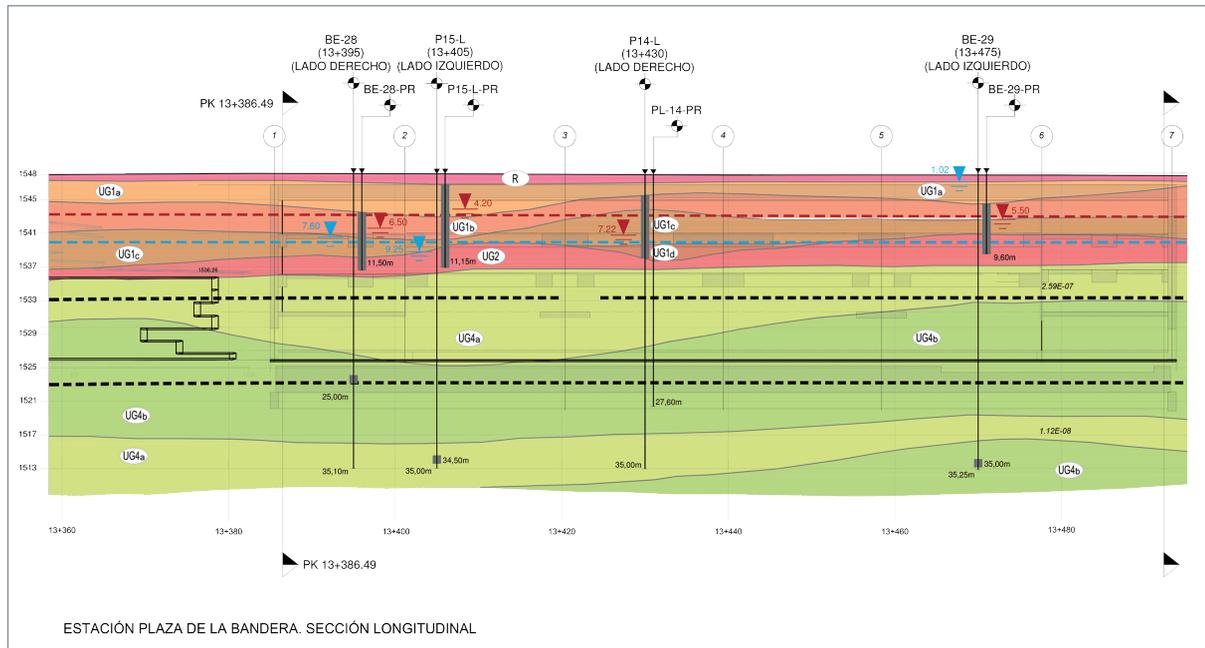
- Acuífero volcánico basal del Mioceno tardío - Plioceno. Emplazado en rocas fracturadas y/o alteradas.
- Acuífero granular del Pleistoceno. Emplazado básicamente en los materiales piroclásticos granulares porosos.

El primero de ellos se trata de un acuífero de comportamiento semiconfinado a confinado, constituido principalmente por flujos de basalto y andesita basáltica, domos, brechas e ignimbritas. Presentan diferentes grados de porosidad secundaria a través de los diferentes esquemas de fracturamiento y/o alteración de las rocas, y permeabilidad por fracturación y alteración.

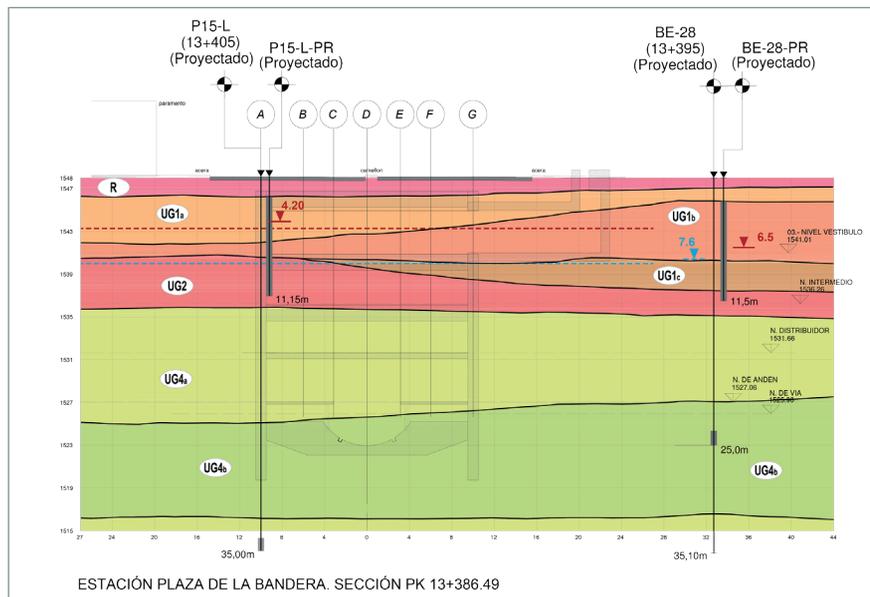
El acuífero granular del Pleistoceno es de comportamiento libre, emplazado básicamente en los materiales piroclásticos granulares porosos (Unidad Toba Tala) y en menor medida en materiales aluviales y de piedemonte.

Respecto a la sismicidad, el emplazamiento se ubica en un entorno sísmico, por lo que se han efectuado las consideraciones oportunas respecto a los coeficientes de empuje en hipótesis sísmica siguiendo la metodología de Mononobe Okabe.

Se describe a continuación el perfil geológico geotécnico del sector de la Estación Plaza de la Bandera (Figuras 4 y 5).



ESTACIÓN PLAZA DE LA BANDERA. SECCIÓN LONGITUDINAL



ESTACIÓN PLAZA DE LA BANDERA. SECCIÓN PK 13+386.49

Figura 5.-Perfil geológico geotécnico longitudinal de la Estación Plaza de la Bandera.

Figura 6.-Perfil geológico geotécnico transversal de la Estación Plaza de la Bandera.

Unidad geotécnica	Situación permanente o transitoria							Situación sísmica		Coeficientes de balasto kN/m ³
	γ kN/m ²	γ_{sum} kN/m ²	k_a	k_r	k_p	c' kN/m ²	\emptyset	k_a	k_p	
UG1a	17.2	0.72	0.317	0.515	2.882	5	29	0.615	2.258	4900
UG1b	17.2	0.72	0.291	0.485	3.124	15	31	1.361	1.361	15100
UG2	17.2	0.72	0.246	0.426	3.690	30	35	1.042	2.019	43800
UG4a	24.0	14.0	0.085	0.171	10.698	220	56	0.376	8.782	300000
UG4b	27.0	17.0	0.059	0.121	15.504	360	62	0.281	13.407	350000

Tabla I.- Parámetros de cálculo del terreno.

Debajo del nivel del relleno antrópico de potencia variable, máximo 2 m se extiende la unidad de Toba Tala (UG1), la cual se ha diferenciado según diferentes niveles de compacidad (UG1a, UG1b...). Bajo ella subyace el suelo residual (UG2) que se extiende de forma continua por toda la estación con una potencia media de 1.5 a 2.0 m y un máximo de casi 4 m.

El sustrato rocoso se sitúa a unos 10 o 12 m de profundidad. Está formado por un nivel superior de basaltos vacuolares (UG4a) de hasta 7 m de potencia, bajo los que se localizan basaltos masivos (UG4b) que alcanzan una profundidad de 30 m. Bajo estos últimos se han reconocido de nuevo basaltos vacuolares.

La roca basáltica vacuolar presenta una calidad variable entre media a buena, con valores de RMR básico entre 50-65 y RQD variables entre 65 y 95%. En el caso de los basaltos masivos predominan los tramos de calidad buena, con valores de RMR básico en torno a 65, aunque con tramos intercalados y de cierta continuidad de calidad media.

El nivel freático de los suelos se sitúan a unos 5 m de profundidad manteniendo una cota bastante constante a lo largo de la estación. Se identificó el nivel piezométrico del acuífero rocoso a unos 8 m de profundidad.

En la Tabla I se especifican los parámetros de cálculo considerados para la modelación de empujes sobre las contenciones.

4.- Descripción de la solución adoptada

El diseño de la solución alternativa se desarrolló en base a un triple planteamiento:

- Garantizar la estabilidad estructural de la contención de tierras.
- Garantizar la estabilidad hidráulica de la contención de tierras.
- Garantizar la capacidad de cimentación requerida para la cimentación de las cargas gravitacionales transmitidas por las losas.

Un aspecto clave para el enfoque de la solución alternativa lo determinó la revisión del contexto hidrogeológico. Se establecieron dos niveles freáticos de diseño, uno para las estructuras que interactúan con los suelos y otro para las estructuras que interactúan con la roca. En este último caso se considera que las estructuras entran en carga en un contexto de largo plazo, posteriormente a las etapas constructivas de la estación. En ambos casos se consideran leyes de presiones hidrostáticas.

Una vez analizados el contexto geotécnico, hidrogeológico, la entidad y condiciones de contorno de la excavación a efectuar y los criterios de diseño asumidos para la contención de tierras se propuso una solución constructiva en la que la ejecución de los muros pantalla se efectuaría mediante cuchara bivalva hasta la cota de aparición de los sustratos rocosos a partir de donde la estructura de contención enlazaría con una cortina de micropilotes empotrada en el terreno bajo la

cota de máxima excavación. La contención y cimentación de la estación finalizaría con un muro forro en cara de intradós de micropilotes y una contrabóveda estructural.

La gran ventaja de esta solución consiste en la disminución del plazo de ejecución, puesto que al llegar al nivel de roca basáltica, el sistema tradicional de excavación con cuchara bivalva deja de ser válido, haciéndose imprescindible el empleo de hidrofresa con sus consiguientes complicaciones logísticas.

En la solución que se adaptó finalmente, las pantallas llegaron hasta el estrato de los basaltos, alcanzando un empotramiento mínimo en ellos de 0,5 metros. Posteriormente se ejecutaron las alineaciones de micropilotes, a través del cuerpo de los muros pantalla, inicialmente a través de pasatubos preinstalados en las jaulas de armadura. Los micropilotes se empotraron un mínimo de 2,65 m en el estrato de roca de basaltos masivos. La separación entre micropilotes fue de 0,75 metros. Desde el pie de la pantalla se ejecutó un muro forro de arriba hacia abajo que conectaba con la contrabóveda.

La problemática asociada a la continuación de la excavación por debajo del pie de las pantallas, se resolvió ejecutando por bataches las excavaciones y porciones de muro forro, cuya altura de pase se definía en función de la resistencia a pandeo de los micropilotes. Este muro forro quedaba colgado de los micros a través de unos ganchos/conectores soldados a ellos y que quedaban embebidos en el espesor del muro forro. Con el objeto de limitar la carga axial que recibían los micros, el forjado del nivel intermedio, se ejecutó hormigonado contra el terreno y conectado a unos pasadores estructurales que transmitían las cargas gravitatorias en el macizo de roca. En fase definitiva este forjado quedaría cimentado por el conjunto muros forro-contrabóveda. El forjado a nivel de distribuidor se ejecutó según el proyecto original, al no ser necesario ningún nivel de acodamiento adicional entre el nivel intermedio y el fondo de la estación.

Este sistema fue factible debido a la gran calidad de la roca, lo cual implicaba su capacidad para recibir las cargas gravitatorias del nivel -1 así como una muy reducida magnitud en los empujes provenientes del trasdós de la excavación.

A modo de resumen, el proceso constructivo contempló las siguientes fases:

- Excavación de plataforma de trabajo ubicada a cota inferior de la losa de cubierta.
- Ejecución de muros pantalla mediante cuchara bivalva hasta la cota que permita el terreno garantizando un empotramiento de 0.5 m en la unidad geotécnica de roca UG4a, Basaltos Vacuolares.
- Ejecución de micropilotes \emptyset_{perf} 180 mm cada 0.75 m. Diámetro de los tubos $\emptyset_{ext}/\emptyset_{int}$ 139,7/115,2 mm.

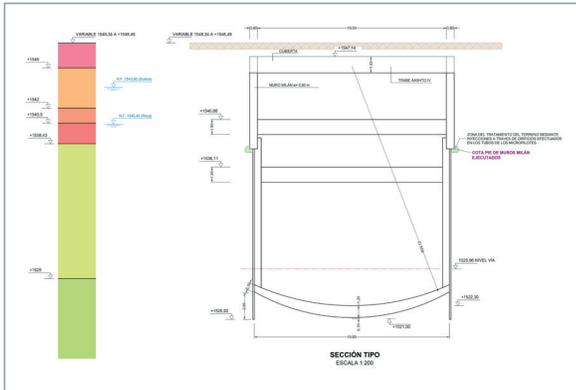


Figura 7.- Sección tipo de la estación.

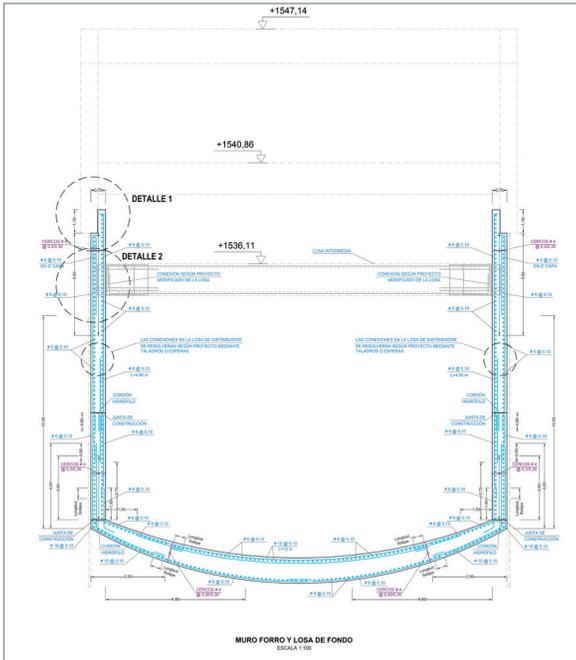


Figura 8.- Sección de armadura de muro forro y contrabóveda.

- Tratamiento del terreno en el entorno del contacto suelo, roca, que a su vez es el entorno de la cota de conexión muros-micropilotes, con el objeto de reducir la porosidad secundaria de la roca y disminuir la afluencia de agua hacia el interior de la excavación en las fases constructivas. El tratamiento se efectuará mediante inyecciones en el terreno efectuadas a través de perforaciones efectuadas en los tubos de los micropilotes.
- Excavación en voladizo de los muros de hasta 4 m desde la cota superior de la losa de cubierta.
- Ejecución de la cubierta.
- Excavación hasta cota inferior de vestíbulo.
- Ejecución de losa de vestíbulo hormigonada contra el terreno.
- Excavación hasta cota de inferior de losa intermedia.
- Ejecución de losa intermedia hormigonada contra el terreno.
- Excavación por pases de 20 m hasta 5,5 m desde la cota inferior de la losa intermedia y ejecución del tramo de muro forro comprendido en esta excavación.
- Excavación de zanja central mediante taludes 1H/4V con ancho inferior de 6,5 m a lo largo de todo el tramo.
- Excavación de los bataches laterales por pases alternos de 12 m de longitud del talud y ejecución de muro forro restante y de la losa de fondo en forma de contrabóveda.

5.- Datos claves de la construcción

Los trabajos de ejecución se llevaron a cabo con éxito y sin mayores incidencias. Durante la ejecución de los muros pantalla se desarrolló un detallado estudio de los pies de cada batache y se procedió a revisar el diseño efectuado en base a las profundidades reales alcanzadas. La excavación de los niveles de roca se efectuó mediante martillo hidráulico.

Destacaron dos cuestiones fundamentales para el éxito del enfoque de diseño planteado:

- Muy elevado índice de calidad de los basaltos en los frentes de excavación registrados
- Prácticamente nula afluencia de agua hacia el interior de la excavación, confirmándose las hipótesis adoptadas en cuanto a la condición de nivel freático en la roca entrando en carga en un contexto de largo plazo.

La constatación de los anteriores dos aspectos así como los reducidos valores registrados en el monitoreo de deformaciones inducidas condicionaron la posibilidad de prescindir de la sectorización de la excavación de bataches y zanja central a un proceso implicando la totalidad de la superficie de la estación.

En mayo de 2018 la tuneladora encargada de la ejecución del túnel de la Línea 3 llegó a la estación con la excavación y estructura de contención y cimentación ejecutadas, efectuándose el arrastre de la máquina por encima de la contrabóveda de la estación.



Figura 9.- Vista del intradós de la excavación en roca.



Figura 10.- Ejecución de pasadores estructurales de nivel intermedio.



Figura 11.- Pasadores estructurales de nivel intermedio.



Figura 12.- Vista desde superficie, excavación a cota de nivel intermedio.



Figura 13.- Vista general, excavación a cota de contrabóveda.

6.- Conclusiones

La solución alternativa de contención de tierras anteriormente expuesta constituye una combinación de éxito de diversos elementos estructurales pertenecientes al ámbito de las técnicas del subsuelo. Mediante su aplicación se consiguió encajar en plazo la construcción de la Estación Plaza de la Bandera dentro del cronograma de trabajos de una obra tan compleja como es una línea de metro. Ello ha sido posible gracias a la implicación de numerosos especialistas así como a una aproximación lo más realista posible a la realidad geotécnica e hidrogeológica del terreno subyacente.

Como en toda obra subterránea, se efectuó un detallado seguimiento durante la ejecución con el objetivo de constatar que las hipótesis adoptadas eran congruentes con la realidad puesta de manifiesto durante la excavación. Fruto de este seguimiento y a medida que la obra avanzaba, se efectuaron diversos ajustes sobre el diseño inicialmente planteado. •

Referencias

- *Proyecto Ejecutivo para el servicio de transporte masivo de pasajeros en la modalidad de Tren Ligero entre los Municipios de Zapopan, Guadalajara y Tlaquepaque, Jalisco. Sener*
- *Jornada técnica Aetos-Aetess. Pantallas en medio urbano para estructuras Subterráneas (2006)*
- *Jornada técnica Semsig-Aetess. Micropilotes (2003)*

