

Excavación profunda en un entorno histórico

Ampliación subterránea del Teatro Colón de Bogotá

Omar Alonso Martínez Galvis
Jimmy Alonso Alvarado Suesca
Geofundaciones



← Foto 1. Estabilización subterránea.
CORTESÍA GEOFUNDACIONES.

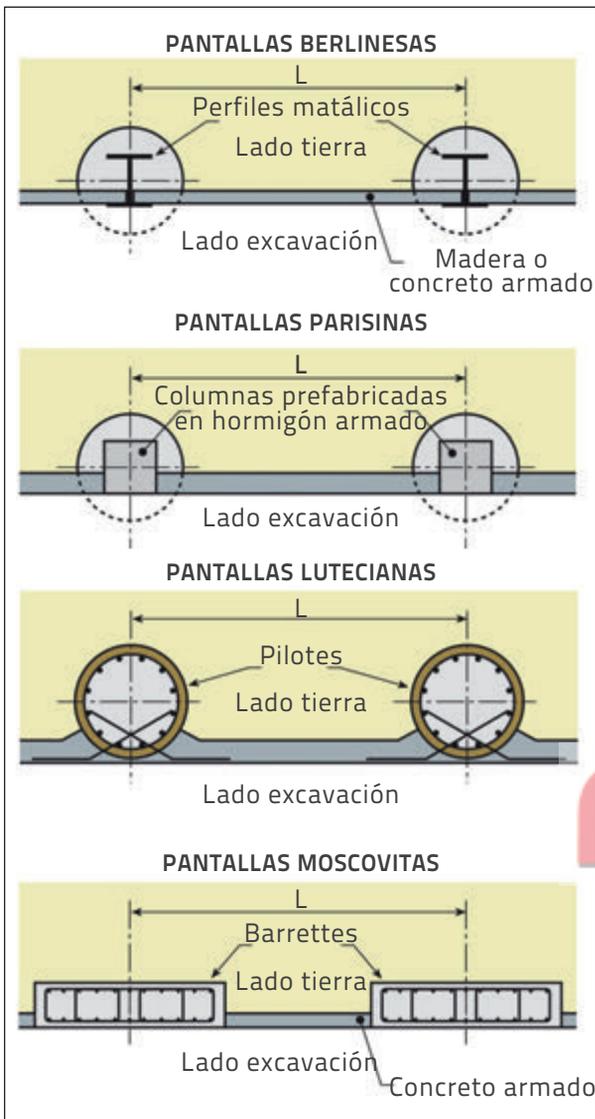
Introducción

La ampliación del Teatro Colón en la ciudad de Bogotá en su tercera etapa, y como proyecto de interés nacional bajo la coordinación en su concepción de diseño por la Sociedad Colombiana de Arquitectos, plantea un reto de excavación urbana de magnitud importante y localización crítica respecto a impactos en los vecinos del proyecto, dadas las condiciones históricas y patrimoniales del sector.

Acometer una excavación de 22 m de profundidad en el centro histórico de Bogotá implica revisar los trabajos similares que, de manera industrial y segura, se realizan en la ciudad y las técnicas disponibles para enfrentar los retos de ingeniería que demanda el proyecto desde su concepción arquitectónica.

Disponer grandes equipos de cimentación causaba gran impacto en pleno centro histórico, tanto para

ingresarlos como para su operación, por lo cual debía plantearse la obra con maquinaria versátil y con ejecución industrializada. Conceptos como las pantallas berlinesa, lutciana, parisina y moscovita (ver Fig.1) llevaron a definir las estructuras de contención temporal y definitiva que se implementaron. Una combinación entre micropilotes secantes para garantizar estabilidad temporal durante primeras fases y dimensionados a una separación tal que el efecto arco de estabilización de suelos trabajara durante dicha fase y, a su vez, disponer en fase definitiva de un conjunto de muros y anclajes temporales, más otros en condición permanente de hasta 120 t. Ambos conceptos unidos con conectores de cortante a lo largo del fuste de los micropilotes que trabajaran como una unidad funcional estructural para garantizar su estabilidad local y general durante todas las fases de la excavación planteada.



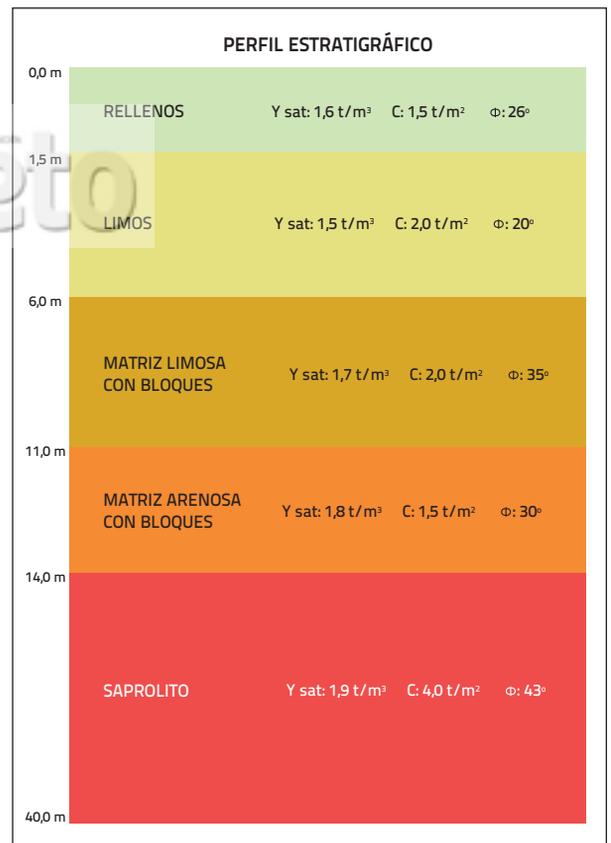
← Figura 1. Tipos de pantallas como estructura de contención alternas. GUÍA TÉCNICA SOLETANCHE BACHY

Caracterización geotécnica

Basados en la microzonificación sísmica realizada para Bogotá en el año 2010, se determina que el proyecto se desarrolle en una zona de transición entre los depósitos de ladera y el piedemonte B. Son suelos de origen coluvial y aluvial compuestos por bloques, cantos y gravas con matriz arcillo-arenosa o areno-arcillosa.

El sector se localiza en el piedemonte de los cerros orientales que incrustan la formación Sabana, con fuerte alimentación de acuíferos y presencia de material granular (arenas, gravas, bloques) en una matriz areno-arcillosa, una formación muy heterogénea por su composición variada y discontinua.

La secuencia estratigráfica del sitio y las propiedades de los suelos considerados se presenta en el siguiente perfil:



↑ Figura 3. Caracterización geotécnica. CORTESÍA SOLETANCHE BACHY CIMAS

Ubicación del proyecto

El proyecto se sitúa entre las calles 10 y 11 entre las carreras 5 y 6 en Bogotá, Colombia.



↓ Figura 2. Ubicación del proyecto y localización de estructuras vecinas. GOOGLE MAPS Y GEOFUNDACIONES

Condiciones de carga

Para la revisión del sistema de contención se consideraron las siguientes cargas:

- Empujes horizontales de la masa del suelo.
- Empuje hidrostático del agua (condición definitiva). Cabe señalar que durante la excavación se construyó un sistema de drenes distribuidos cada 3,6 m (horizontalmente) y 3,5 m (verticalmente), por lo cual la presión del agua no actuó sobre los muros durante la fase constructiva.
- Sobrecargas de las estructuras vecinas.

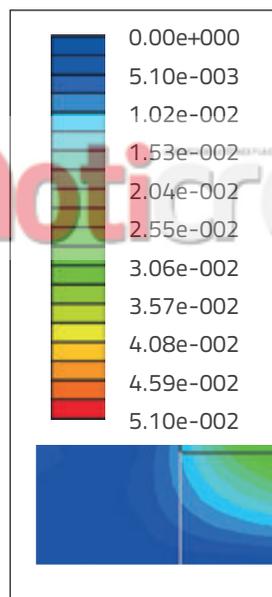


← Foto 2. Estructuras vecinas.
CORTESÍA GEOFUNDACIONES

Descripción del sistema de contención

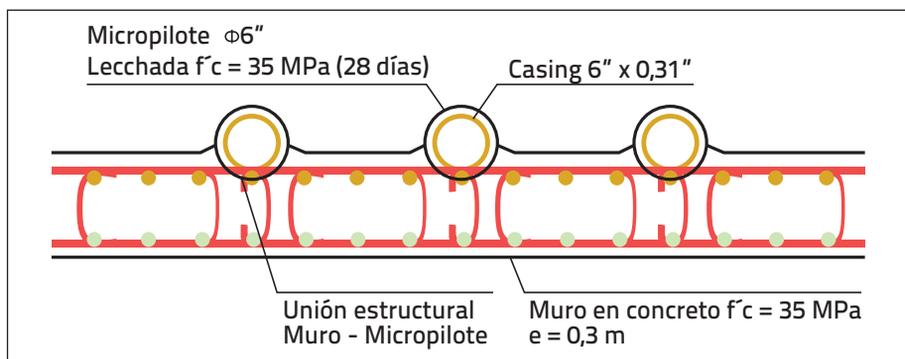
El sistema de contención que se planteó inicialmente, basado en caissons a mano y desconfinamiento por trincheras, no se percibía como lo más adecuado y seguro para el proyecto y su entorno, donde la factibilidad constructiva se vería comprometida dado el reto del proyecto y la garantía de estabilidad continua en este sector particular de la ciudad.

El sistema de contención finalmente considerado estaba conformado por una pantalla discontinua de micropilotes de 8" de diámetro reforzados con tubería estructural de 6" y de calibre de 0,31" separados cada 60 cm entre centros, instalados con empotramiento de 2 m por debajo del fondo de excavación antes de iniciarla, permitiendo excavaciones masivas, y un muro de concreto de 0,3 m a 1 m de espesor unido estructuralmente con los micropilotes (Figura 4).



tuantes sobre la pantalla de contención. Se obtuvieron, además, las cargas de bloqueo y servicio de los anclajes activos provisionales y definitivos a utilizar. En el caso de los troqueles se obtuvo la carga de servicio máxima por metro lineal que soportaría el elemento, a partir de la cual se dimensionaron las secciones.

Figura 5. Desplazamientos presentados en la etapa del nivel máximo de excavación.
CORTESÍA GEOFUNDACIONES



Para los micropilotes y el muro se usó concreto de 35 MPa y el acero del casing de los micropilotes de grado 50.

↑ Figura 4. Concepto estructural-geotécnico de excavación alternativo para el proyecto.
CORTESÍA GEOFUNDACIONES

Análisis del sistema de contención

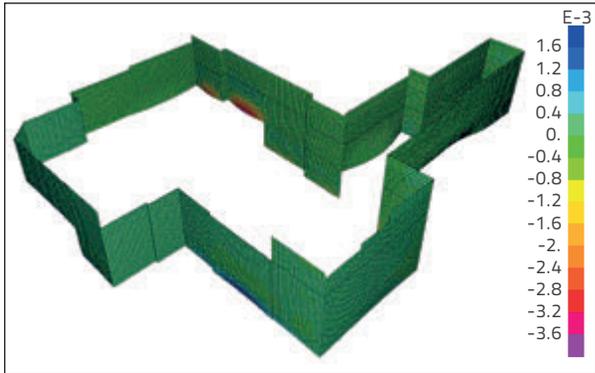
Para el análisis del sistema de contención se utilizaron dos métodos de cálculo basados en elementos finitos y el módulo de reacción del suelo, considerando la secuencia de excavación a aplicar durante la ejecución del proyecto, obteniendo los empujes del suelo, desplazamientos, esfuerzos cortantes y momentos flectores ac-

Para determinar la longitud de bulbo de los anclajes se utilizó la recomendación francesa TA-95, considerando un diámetro de perforación de 6" y una inyección de tipo IRS, cada uno de ellos bloqueándose con prueba previa y verificación de conformidad.

Los diferentes estratos de suelo se modelaron como materiales elasto-plásticos aplicando el modelo constitutivo Mohr-Coulomb y según las propiedades mecánicas mostradas en el perfil de la figura 3. Sin embargo, teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad de descarga en los suelos es mayor que el módulo de elasticidad a la compresión, se consideró que toda la columna de suelo dentro de la zona de excavación presentaba módulos de elasticidad 3 veces mayores a los mostrados en dicho perfil.

Para el análisis se modelaron los micropilotes, el muro, los troqueles y las losas de entrepiso como elementos tipo liner. Por su parte, los anclajes temporales activos se modelaron como elementos *bolt* tipo *tieback*.

Dado que los análisis de elementos finitos realizados son análisis de deformaciones planas, las columnas de la estructura fueron modeladas como elementos tipo liner considerando su sección e inercia por metro lineal, es decir, que se dividió la inercia y sección de los elementos por su longitud aferente. También se estudió la estructura de contención con software de evaluación del comportamiento estructural para definir los sectores que presentan mayores sollicitaciones.



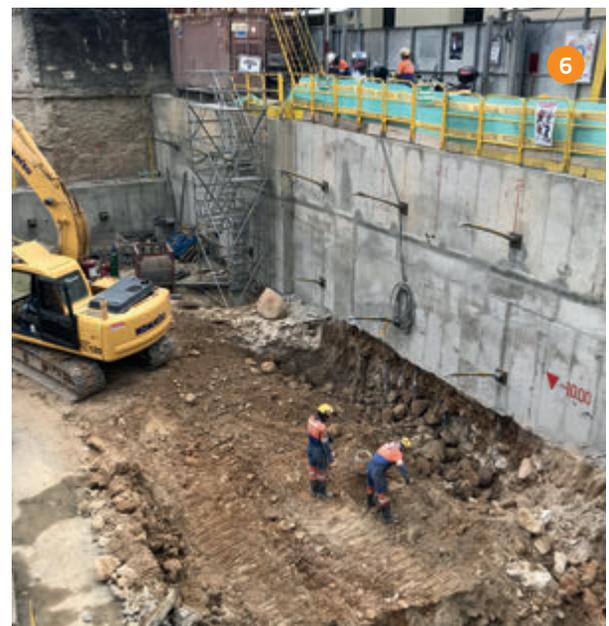
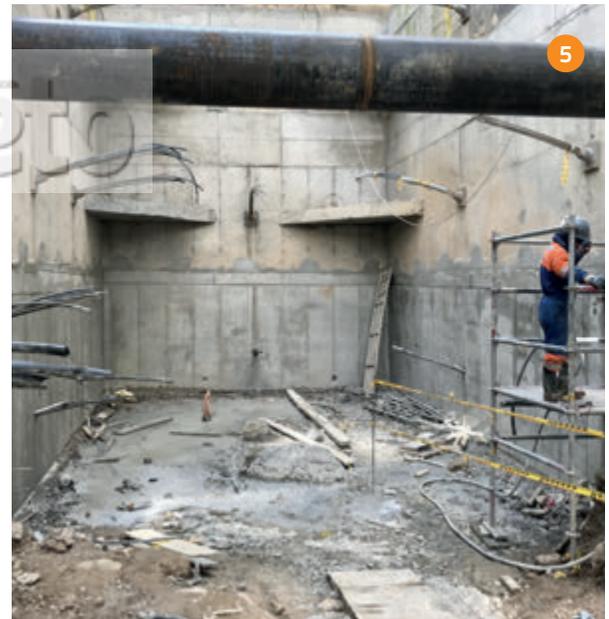
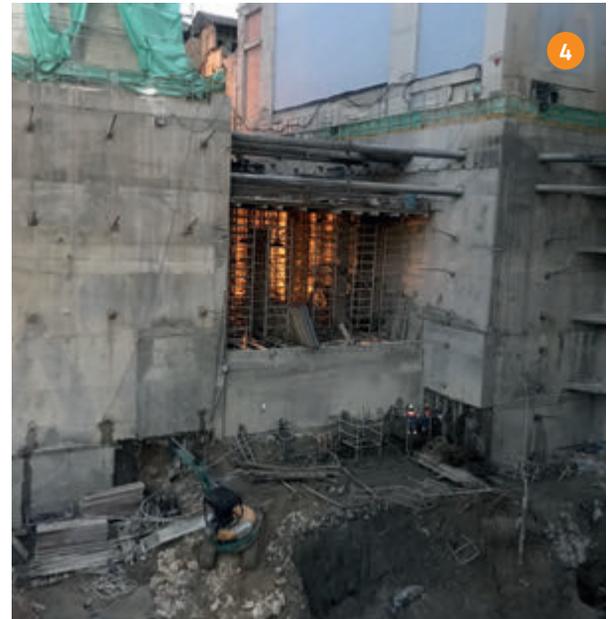
↑ Figura 6. Aplicación de envolventes de empujes sobre muros.
CORTESÍA GEOFUNDACIONES

Secuencia constructiva

Después de ejecutar los micropilotes de contención y viga cabezal se iniciaban los siguientes ciclos hasta llegar al nivel máximo de excavación. Se excavaba una altura de 3 m, se construía el muro de contención formateado y se ejecutaban los anclajes. Después de tensionarlos se iniciaba otro ciclo de excavación, y así hasta la cota -22 m en el nivel más profundo.

Para el análisis de condiciones permanentes se tuvieron en cuenta las siguientes premisas:

- Se consideró una condición de presión hidrostática (a un nivel -6,0 m respecto al nivel superior del muro del corte 2 – 3 m).
- Se tomó la rigidez del conjunto, muro de concreto + micropilotes.
- Se optó por la siguiente secuencia de construcción:
 - Construcción de losa de fondo.
 - Construcción de la estructura de sótano.
 - Destensado de anclajes.
 - Condiciones a largo plazo, reducción del módulo de elasticidad de los elementos de contención.



Fotos 3, 4, 5 y 6. Proceso de excavación, Teatro Colón.
CORTESÍA GEOFUNDACIONES

Instrumentación geotécnica

Con el fin de hacer seguimiento en tiempo real, la obra fue provista de elementos de medición: inclinómetros, piezómetros, clinómetros y celdas de carga. Estos equipos permitieron detectar cualquier comportamiento anómalo durante la excavación. La ubicación de cada uno de ellos se definió de acuerdo con los sectores considerados críticos durante la ejecución de la excavación.

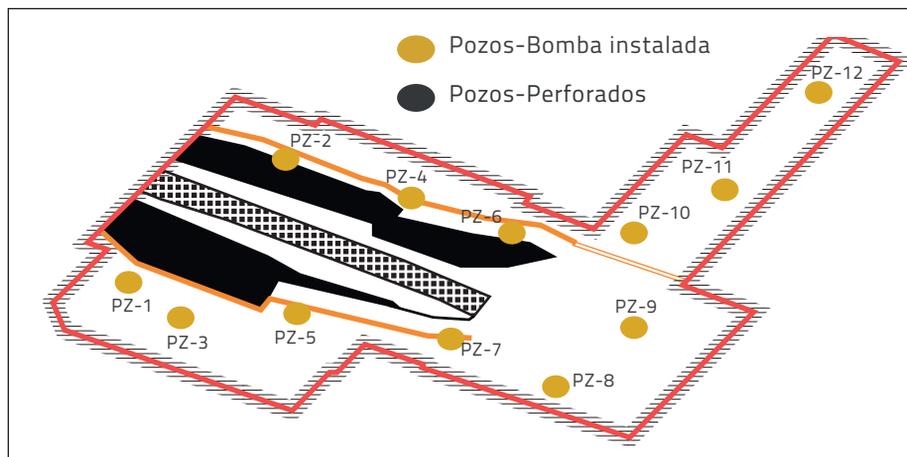
Mediciones con instrumentación geotécnica y resultados de modelación

Para llevar a cabo el seguimiento de la excavación se construyeron gráficas con datos de control periódicos representando los desplazamientos en puntos específicos y se compararon con los modelos geotécnicos.

De manera general, los desplazamientos medidos coincidían o se encontraban por debajo de las curvas de desplazamiento por etapa o de la envolvente construida tras la superposición de todas las etapas. Los desplazamientos máximos esperados fueron de 2 hasta 3 cm.

Abatimiento del nivel freático durante la excavación

Un aspecto clave que se controló durante la excavación fue la evacuación de aguas subterráneas, puesto que gran parte de la excavación se desarrollaría bajo el nivel freático señalado en los reportes del estudio de suelos.



Conclusiones

Las excavaciones urbanas son obras que tienen un impacto importante sobre las zonas aferentes, dado el desconfinamiento de suelos que llevan implícito y su afectación a condiciones de reposo de los suelos circundantes, más aún cuando dichos sectores tienen condiciones patrimoniales y de valor para las ciudades. Planear sistemas constructivos alternativos que garanticen mejor homogeneidad en los impactos que causen siempre será una buena práctica para analizar las afectaciones urbanas asociadas a los riesgos que significan. En algunas ocasiones no se cuantifican, y de allí la importancia de invertir este tiempo de planeación y factibilidad constructiva.

↑ Figura 7. Distribución espacial en el proyecto de los pozos de abatimiento de aguas subterráneas bajo control piezométrico continuo. CORTESÍA GEOFUNDACIONES

El sistema planteado para la excavación analizada, conformado de micropilotes preexistentes a la excavación junto con muros estructurales anclados, es una opción versátil para lotes pequeños con predios de difícil acceso dado que los equipos que esta técnica requiere son fácilmente adaptables a diversas condiciones.

Como en cualquier obra geotécnica de alto impacto, en una excavación urbana es de vital importancia tener planes de reacción ante imprevistos como deformaciones, manejos de aguas, sobrecargas, cambios de proyectos, tal como se expone en los planteamientos desarrollados para análisis bajo método observacional. Comparar las deformaciones reales frente a los modelos matemáticos iniciales, para cada fase de avance de las obras, significa tener un mejor conocimiento y rebajar incertidumbres del espectro geotécnico.

Confirmar los modelos geotécnicos planteados e hipótesis de cálculo o calibrarlos ante cualquier eventualidad, desarrolla conocimiento del comportamiento del suelo, que es vital para el avance de la ingeniería geotécnica, entendiendo los riesgos que van asociados a estos cálculos.

Buscar nuevas técnicas de construcción y adaptarlas a los retos planteados, son opciones válidas que estimulan la innovación en la industria de construcción geotécnica. Generar procesos eficientes controlados y medibles es clave para desarrollar buenas prácticas y conocimiento de nuestra ingeniería.

Referencias

- Bustamante, M. (1985). «Une méthode pour le calcul de tirants et des micropieux injectés», Bull. Liaison Labo, P. et Ch. No 140, nov-déc, pp. 74-95.
- Littlejohn (1979). «Design estimation of the ultimate load-holding capacity of ground anchors», Symposium on prestressed ground anchors, Concrete Society of South Africa.
- Fenoux AND Portier (1972). «La mise en précontrainte des tirants», Travaux, Vol. 54, No. 449/450, 1972, 33-43
- Jabertou, A. (2006). «Tirants d'ancrage précontrainte», Comparaison norme européenne-TA95, Soletanche Bachy, 31 mars 2006
- FHWA (1999). «Ground anchors and anchored systems», Publication FHWA-IF-99-015, Geotechnical engineering circular No.4, U.S. Dept. of Transportation
- Estudio de suelos y análisis de cimentaciones, Ampliación Teatro Cristóbal Colón presentado por la firma Alfonso Uribe S., Cia. S.a., con nomenclatura AUS-12655-1 (junio, 2014).