

Simulación de Excavaciones Profundas a Cielo Abierto Usando el Método de Elementos Finitos

Simulation of Deep Excavations Opencast Using the Finite Element Method

Rubby Vanesa Ballesteros Granados

Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales “GIISAG”, Facultad de Posgrados de Ingeniería / Maestría en Geotecnia, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, Tunja, Colombia.
Rubby.Ballesteros@uptc.edu.co

Recibido / Received: 30-09-2016 – Aceptado / Accepted: 14-04-2017

Resumen

En el presente documento se simula el comportamiento de una excavación profunda usando el método de elementos finitos dentro del criterio de estados límites de servicio. Se presenta la metodología de trabajo desarrollada en 8 etapas, y se muestra los resultados de una excavación profunda a cielo abierto idealizada con una sección Cut & Cover tipo B. Con el modelo Hardening soil, se simula el comportamiento de suelos blandos de la ciudad de Bogotá, y los elementos estructurales, tal como muros, pantallas, losas y puntales se simulan como elementos elásticos tipo Plate. Para la caracterización del suelo y de los elementos que componen la excavación, se recopila información disponible de los estudios y diseños para la primera línea del metro, tramo IV, sector Cantón Norte. La modelación es realizada en 8 etapas simulando el proceso constructivo y, en consecuencia, los resultados muestran las deflexiones del muro pantalla y los asentamientos en las construcciones aledañas.

Palabras clave: Excavación a cielo abierto, Elementos tipo Plate, Suelos blandos, Método de elementos finitos, Deflexiones.

Abstract

In this document the behavior is simulated within the criterion of service limit states of deep excavation using the finite element method. The methodology of running thesis entitled: Analysis of deformation in open pit excavations in soft soils of Bogota is presented, and the results of an application example where that considers a deep open pit with a section type B Cut & Cover. With the Hardening soil model the behavior of soft soils of the city of Bogota, and structural elements such as walls and slabs screens are simulated simulated props Plate type as elastic elements. For characterization of the soil and the elements of the excavation, information available from studies and designs for the first subway line, section IV, North Canton sector collected. The modeling is performed in 8 stages simulating the construction process and consequently the results show deflections wall and settlements in the surrounding buildings.

Keywords: Open pit excavation, Plate type elements, soft soils, Finite Element Method, Deflections.

I. INTRODUCCIÓN

La aplicación de las herramientas computacionales como los programas de elementos finitos que se encuentran disponibles en el mercado de la rama de la ingeniería para la modelación, tiene cada vez más influencia y más acogida en los consultores, constructores e investigadores, ya que este método brinda la posibilidad de representar diversos problemas geotécnicos, establecer condiciones específicas, tales como aplicación de sobrecargas, procesos de consolidación, interacción suelo-estructura, y con base en los resultados obtenidos es posible dar recomendaciones prácticas que ayudan a los consultores investigadores y constructores, a tomar decisiones sobre las medidas a implementar en un proyecto determinado.

Es por ello que, el uso de estas herramientas requiere de una adecuada y detallada selección de los parámetros de ingreso al modelo que representa el suelo, puesto que esto nos dará el grado de confiabilidad que tiene el modelo realizado.

Uno de los problemas que puede ser simulado y del cual trata el presente documento, es la realización de excavaciones profundas a cielo abierto, ya que como se ha observado, en el medio se lleva a cabo excavaciones a grandes profundidades, bien sea para construcción de sótanos o para líneas de transporte, estas excavaciones en la mayoría de las ocasiones están proyectadas en zonas donde hay construcciones aledañas y es importante conocer antes de realizar la excavación, la magnitud que tendrán las deflexiones en los muros y qué asentamientos se producirán en las construcciones existentes [1], [2].

En este documento se presentan los resultados de una modelación idealizada de una excavación profunda a cielo abierto, con la influencia aledaña de una carga de tránsito y una edificación de 3 niveles, en el sector de la calle 100 de la ciudad de Bogotá.

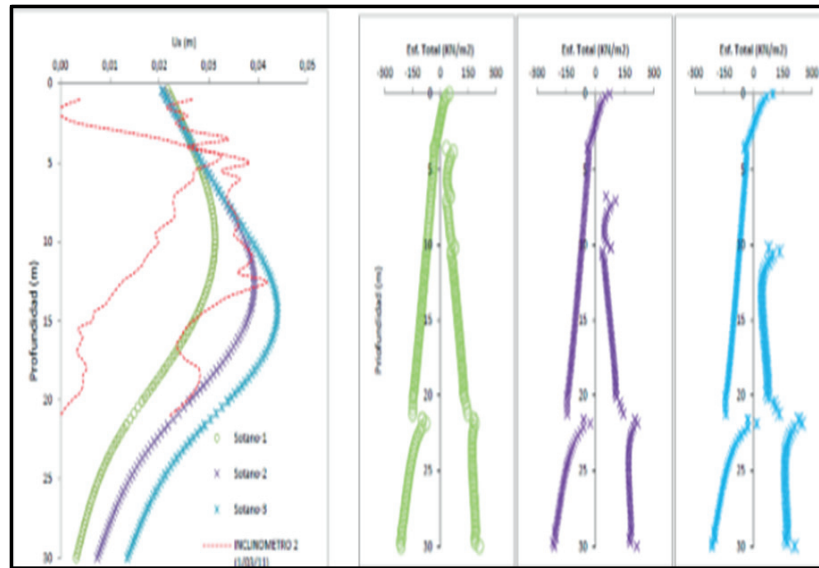
Se utiliza el método de elementos finitos con el modelo Hardening Soil, en donde los parámetros de caracterización del suelo se toman de registros de análisis de registro de piezocono CPTu [3] [4], con una comparación alterna de ensayos de laboratorio. Adicionalmente, la geometría y características de los elementos estructurales como pantallas, losas y puntales se toman de los diseños actuales para la construcción de la primera línea del metro tramo IV en el sector Cantón Norte de la calle 100 [5].

II. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada se presenta en 8 etapas, en la primera se realiza una breve revisión documental de modelación de excavaciones a cielo abierto a nivel nacional [6], [7]; la segunda consiste en la recolección de información existente y disponible del sector del Cantón Norte, de donde se va a recolectar la información para realizar el modelo; en la tercera se determina el perfil estratigráfico [3]; en la cuarta, se define la geometría y parámetros estructurales de la excavación y las sobrecargas aledañas la excavación; en la quinta, se determinan las propiedades de los materiales estructurales, tales como pantallas, puntales, losas; en la sexta, se muestra el proceso constructivo; en la séptima, modelación de una excavación profunda [5]; en la octava, presentación de resultados teniendo en cuenta el modelo analizado con *software* de elementos finitos.

A. Revisión Documental

A nivel nacional, se han adelantado trabajos relacionados con la estimación de deflexiones en el muro, deformaciones del fondo y asentamientos con la ayuda de *software* de elementos finitos. [6] presenta un análisis del comportamiento de los esfuerzos en excavaciones en suelos blandos de la ciudad de Bogotá, para distintas etapas de construcción utilizando el programa Plaxis 2D, simulando numéricamente las excavaciones hechas en tres proyectos tomados como casos de estudio.

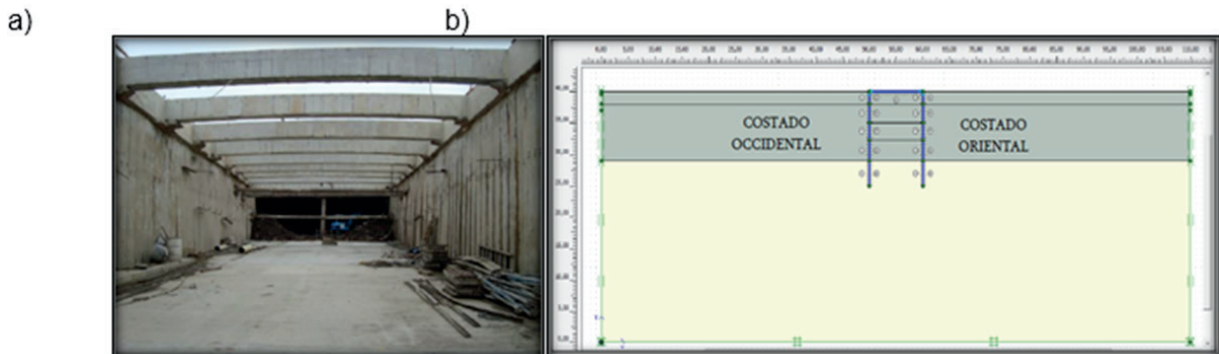


Fuente: Referencia [6].

Fig. 1. Deformación en la pantalla y esfuerzos en la excavación para distintas etapas de construcción.

Olaya (2015) [7] realiza un análisis mediante elementos finitos del caso de estudio de la excavación realizada para la construcción del paso deprimido ubicado sobre la Avenida el Dorado (Calle 26) con Avenida Ciudad de Cali (Carrera 86), de la ciudad de Bogotá D.C., como parte de la construcción de la Fase III de Transmilenio, durante el año 2007. En este caso, se presentaron algunos problemas en el proceso constructivo, tales como: deformación excesiva de las pantallas, fisuración de

las mismas, asentamiento de las pantallas antes de la excavación y aparición de grietas en el terreno adyunto. Basado en los estudios de suelos del sector, elaboró un modelo que fue calculado con ayuda del *software* Plaxis, obteniendo una visión de la interacción suelo-estructura, para determinar a partir de esto, unos criterios geotécnicos para el diseño de excavaciones en suelos blandos para ser aplicados en la práctica.



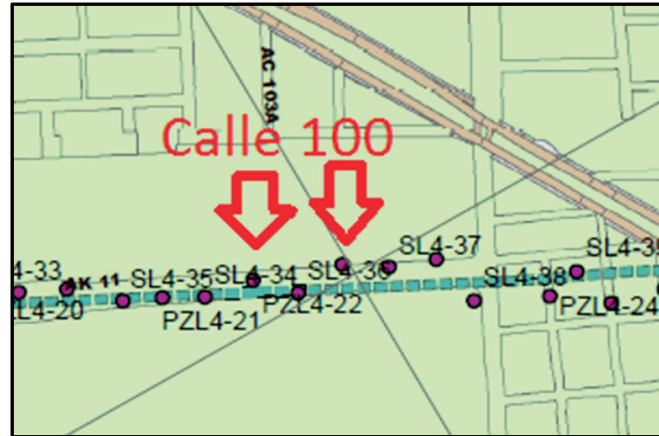
Fuente: Referencia [7]

Fig. 2. (a) Paso deprimido, (b). Modelo de análisis base.

A. Recolección de Información Existente

Para la información de ingreso al modelo, se seleccionó el sector correspondiente a la CANTON NORTE, calle 100 en el K4+200, de

los estudios primera línea del metro, este sector es clasificado como “Lacustre A”, según el mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá D.C. [8]. En la Fig.3 se ilustra el sector en estudio y la localización de los sondeos y del registro de Cptu.



Fuente: Referencia [5].

Fig. 3. Ubicación de zona de estudio

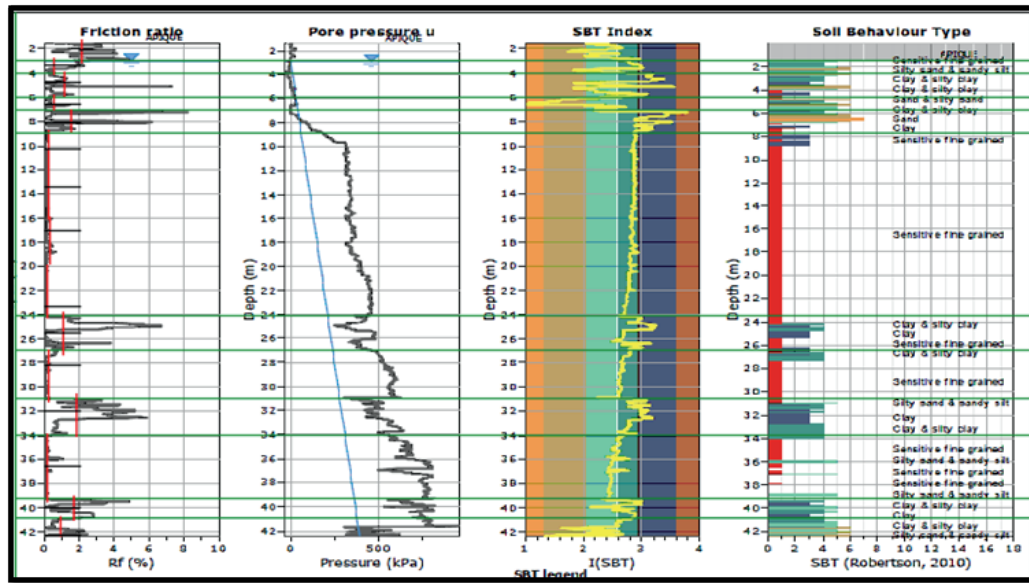
Una vez determinado el sector, se estudia la información disponible de los sondeos SL4-34, SL4-36, y el ensayo geofísico CPTu PZL4-22, llevados a cabo en el marco de la elaboración de estudios técnicos para la primera línea del metro de Bogotá, para consolidar con esta información un solo perfil estratigráfico.

C. Determinación de Perfil Estratigráfico

Con base en la información del registro del CPTu PZL4-22, se saca un perfil promedio que es verificado con la caracterización realizada por medio de los sondeos SL4-34 y SL 4 -36 [5].

1) Prueba de Penetración con Cono, con Medición de Presión de Poros (U) CPTu PZL4.35:

El ensayo CPTu permite obtener la resistencia por punta, por fricción y la medición de la presión de poros para un suelo determinado, permitiendo un registro rápido y continuo de la estratigrafía, permitiendo además la identificación de capas muy delgadas [4]. En este caso, tenemos información disponible del registro CPTu PZL4-22, a 50 m de profundidad, para el cual, dependiendo del índice de comportamiento, se determina qué capas de suelo presentan un comportamiento similar, y así se determinan los estratos.



Fuente: Referencia [5]

Fig. 4. Registro CPTu, sector Cantón Norte.

La Fig.4. muestra la determinación de estratos con base al registro del CPTu. PZL4-22. A continuación, en la Tabla 1, se muestra el resumen de las propiedades obtenidas.

TABLA 1. RESUMEN DE PROPIEDADES DE INGRESO AL MODELO

Prof.	Descripción	γ g/cm3	C KPa	ϕ (°)	ψ (°)	E_{oed}^{Ref} MPa	E_{50}^{Ref} MPa	E_{ur}^{Ref} MPa	m	Ko
0 – 3	Relleno antrópico con arcilla limosa.	1.4	0.2	20.1	0	28.18	28.18	84.55	0.5	0.5
3 – 4	Arcilla Fina Limosa.	1.4	9.73	20.1	0	27.40	27.40	82.19	0.72	0.96
4 – 6	Limo café arcilloso con arena limosa.	1.39	6.29	20.1	0	25.02	25.02	75.07	0.72	0.86
6 – 7	Arena arcillosa y arena limosa con presencia de materia orgánica, café oscuro.	2.11	8.43	20.1	0	99.72	99.72	299.15	0.5	0.5
7 – 9	Suelo fino sensitivo de grano fino, Limo arcilloso, café oscuro.	1.4	10	25.08	0	5.04	5.04	15.13	0.89	0.54
9– 24	Suelo de grano fino sensitivo con limo de alta plasticidad con presencia de materia orgánica.	1.44	10	20	0	2.7	2.7	8.1	0.998	0.53
24–27	Arcilla sensitiva, de grano fino de alta plasticidad con presencia de materia orgánica.	1.44	10.73	22.33	0	1.5	1.5	4.51	0.93	0.53
27– 31	Suelo de grano fino sensitivo.	1.25	11.06	22.84	0	1.36	1.36	4.07	1	0.53
31– 34	Suelo de grano fino sensitivo, arcilla con presencia de materia orgánica.	1.33	11.30	22.41	0	1.31	1.31	3.92	0.95	0.53
34 – 39	Suelo sensitivo de grano fino, arcilla de alta plasticidad con presencia de materia orgánica	1.6	11	23.74	0	1.15	1.15	3.44	0.99	0.56
39 – 41.5	Suelo de grano fino sensitivo con arcilla con presencia de limo y materia orgánica	1.49	11	25.26	0	3.29	3.29	9.87	0.74	0.5
41.5 – 50	Limo arcilloso con arcilla y algo de arena.	1.69	11	20.1	0	31.43	31.43	94.29	0.73	0.96

Fuente: El autor, 2016.

D. Determinación de las Propiedades de los Materiales Estructurales

Como elementos estructurales, se encuentran las pantallas, los puntales, la losa de cubierta, vestíbulo y cimentación. Estos elementos son modelados como tipo Plate y sus propiedades son las recopiladas en la Tablas 4, 5 y 6.

Las pantallas son en concreto reforzado de 35 Mpa, de longitud de 50 m, de espesor de 1.2 m y con separación de 10.4 m entre ellas, para un ancho total de 12.8 m; por tanto, el ancho en el modelo corresponde a 11.6 m.

TABLA 4. PROPIEDADES ESTRUCTURALES PANTALLAS Y PUNTALES

Parámetro	Pantalla continua	Puntales separados 2.5m Perfiles HEM 600
EA (KN* m)	3.4E+07	3.1E+06
EI (KN *m*m^2)	4.1E+06	2.0E+05
W (KN)	20.1	17
V	0.15	0

Fuente: El autor, 2016.

Las losas en concreto reforzado de 35 MPa, para la profundidad: 1.5 m, construcción de losa de cubierta de 1 m; posteriormente, losa de Vestíbulo de 0.95 de espesor, y losa de cimentación cóncava de espesor 0.8 m.

TABLA 5. PROPIEDADES ESTRUCTURALES LOSAS

Parámetro	Losa cubierta	Losa vestíbulo	Losa Cimentación
EA (KN* m)	2.8E+07	2.7E+07	2.3E+07
EI (KN *m*m^2)	2.4E+06	2.0E+06	1.2E+06
W (KN)	17	15.96	13.44
V	0.15	0.15	0.15

Fuente: El autor, 2016.

Una vez terminada la instalación de los muros pantallas, se construirá columnas Jet Grouting de 5.5m de espesor. Las cuales se espera que sirvan como apuntalamiento horizontal para las pantallas, impermeabilizar el fondo de la excavación y servir como losa de cimentación provisional en la ejecución de la excavación.

TABLA 6. PARÁMETROS DE DISEÑO JET GROUTING

Parámetro	Jet Grouting
Módulo de Young (KN/m2)	1.2E+07
Peso específico (KN/m3)	20
V	0.15
Cohesión (KPa)	600
Ángulo de fricción	31
Dilatancia	1
Tipo de material	No Poroso

Fuente: El autor, 2016.

E. Proceso Constructivo

Se sigue la siguiente secuencia de excavación [5]:

- Excavación hasta la cota de las pantallas 1.5m.
- Excavación y ejecución de pantallas.
- Ejecución de columnas Jet Grouting.
- Excavación y ejecución de losa Cubierta.
- Excavación a puntal 1 e instalación de perfil provisional HEM 600.
- Excavación y ejecución de losa intermedia.
- Excavación y ejecución de losa de cimentación.

F. Modelación de una Excavación Profunda

Se modela la excavación profunda introduciendo la influencia de una carga de tránsito de 10 KN/m² y una edificación de 3 niveles representada por una carga de 33 KN/m² [9]. Para representar el comportamiento del suelo se utiliza el modelo Hardening Soil, [10], [11] con los parámetros anteriormente citados.

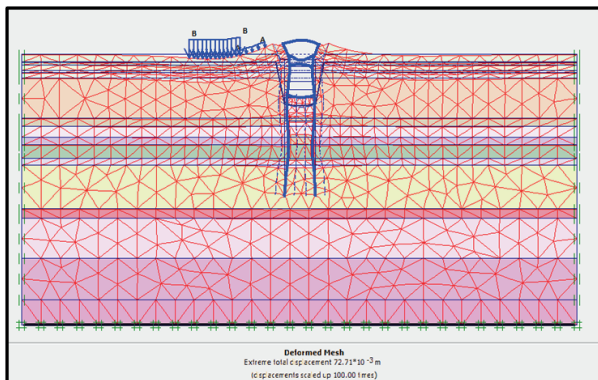
Se modela con deformación plana y elementos de 15 nodos, adicionalmente se tiene en cuenta el suelo en condición no drenada [12], con nivel freático a 3 m de profundidad.

Como condiciones de frontera, se deja en sentido vertical, 1 vez la profundidad de las pantallas; y en sentido horizontal, 2 veces la profundidad de las pantallas, es decir 50 m y 100 m, respectivamente.

Los elementos estructurales se modelan como elementos tipo Plate con interfaces [12]; y el Jet Grouting, como un material no poroso con las propiedades del hormigón descrito en la Tabla 6.

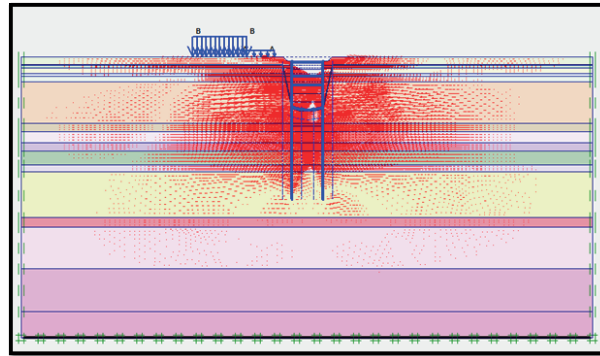
Se establece el peso del agua de 10 KN/m³, posteriormente se establecen las tensiones iniciales y se genera la malla muy fina, para poder obtener mayor precisión en los datos de salida.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



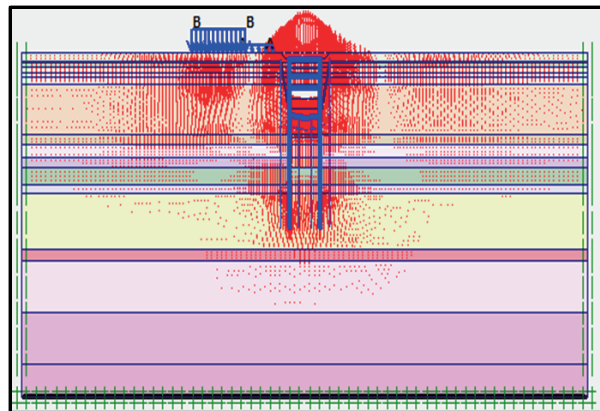
Fuente: El autor, 2016.

Fig. 6. Deformada de la malla, interfaz gráfica.



Fuente: El autor, 2016.

Fig. 7. Desplazamientos horizontales.



Fuente: El autor, 2016.

Fig. 8. Desplazamientos verticales.

En la Fig. 6, se aprecia que la distancia de separación entre muros pantallas en la zona de la instalación de Jet Grouting se conserva. Por lo contrario, a una profundidad de 45 m se aprecia que debido a la redistribución de esfuerzos producto de las intervenciones realizadas, se generan desplazamientos horizontales mayores que tienden a deflectar los muros pantallas. También se resalta en la Fig. 6. que los puntales tienen un comportamiento de deformación distinto de la losa de vestíbulo y cubierta. Aunque los tres elementos responden a la deformación de las pantallas, la diferencia se debe a que el puntal provisional tiene una deformación cóncava debido a que el peso del elemento es mayor. En el caso de la losa de cubierta y vestíbulo, se trata de elementos tipo placa que son continuos, por ello, se observa que se deforma uniformemente.

Es notorio en la Fig. 7 que, producto de la excavación, se producen desplazamientos horizontales, en

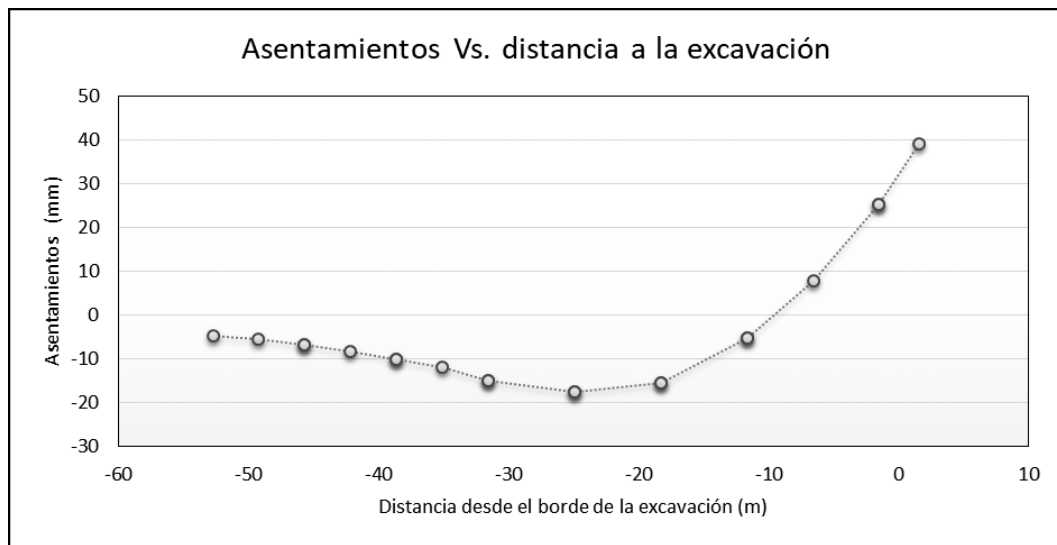
dirección del centro de los muros pantallas; y en la Fig. 8 se evidencia que los desplazamientos verticales influyen la excavación y, adicionalmente, la zona en donde se encuentra ubicada las cargas A y B, que representan las cargas de tránsito y edificación de 3 Niveles, respectivamente.

Otra anotación importante consiste en que, debido a la instalación del Jet Grouting, la losa de cimentación no presenta deformaciones considerables en

comparación con la losa de cubierta y la losa de vestíbulo.

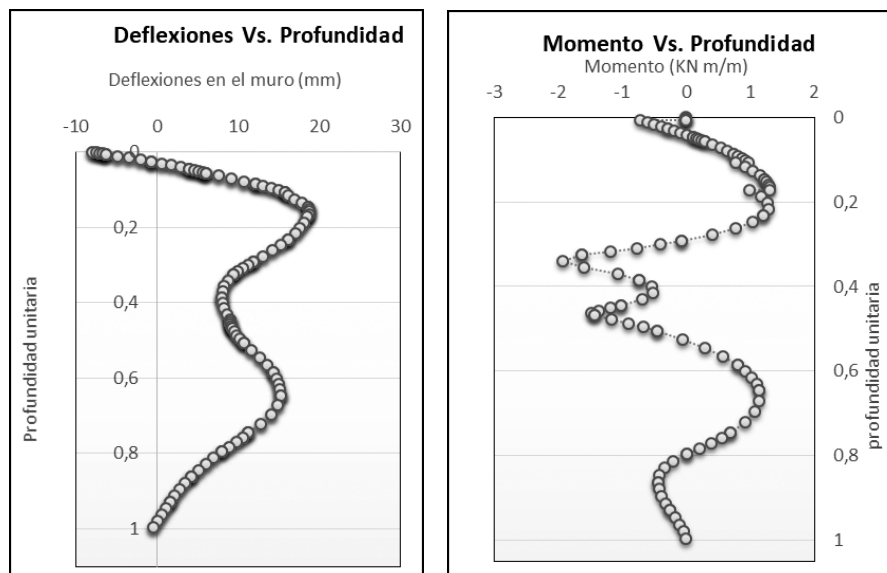
G. Gráficas

Los resultados se presentan normalizados con la profundidad, de tal manera que puedan ser aplicativos a otras profundidades de excavación, por tanto, para este caso aplicativo de 50 m de profundidad del muro pantalla, corresponde a 1 Und.



Fuente: El autor, 2016.

Fig. 9. Asentamientos en construcciones aledañas.



Fuente: El autor, 2016.

Fig. 10. (a) Deflexiones en el muro pantalla (b) Momento en el muro Pantalla.

En la Fig. 9, se observa que, producto de la excavación, la carga de 33 KNm/m ejerce una compresión sobre el suelo produciendo un asentamiento máximo de 17.5 mm. Por otra parte, se evidencia que, producto de esta modificación en las condiciones iniciales, el suelo sobre el que se encuentra la carga de 10 KN/m², que representa la carga de tránsito de una vía, sufre un levantamiento hasta de 25 mm.

Se puede notar que, según la Fig. 10 (a), en el muro pantalla en el nivel de losa de cubierta se presenta una deflexión en sentido negativo con una magnitud de 8mm; y, posteriormente, va aumentando con la profundidad.

Las mayores deflexiones en el muro se evidencian, según la Fig. 10 (a), a un intervalo de profundidad correspondiente de 0.1 a 0.2 veces la profundidad de la pantalla. Específicamente, en este caso de estudio, como la longitud de la pantalla es de 50 m, la mayor deflexión se localiza a 8 m; profundidad en la cual se instala la losa de vestíbulo de características citadas anteriormente en la Tabla 5, y en donde se observa un desplazamiento de magnitud de 18.78 mm, con un momento de 1283 KNm/m.

Debido a las deflexiones presentes en el intervalo de 0.1 a 0.2 veces la profundidad del muro pantalla, allí se instalan elementos estructurales que sufren deformaciones y ayudan a mitigar estos desplazamientos en la pantalla. Estos elementos corresponden a los puntales representados por perfiles provisionales HEM 600 y a la losa de vestíbulo.

Se ilustra en la Fig. 10 (a) que, a 0.4 veces la profundidad del muro pantalla, el Grouting sirve como empotramiento entre los muros pantallas, ayuda a mantener la separación inicial entre los mismos y se puede apreciar que en el nivel de localización del mismo, se presentan deflexiones de 10 mm, que son relativamente menores a las presentes a lo largo de las primeras fases de

excavación en donde los muros pantallas presentan mayores deflexiones.

IV. CONCLUSIONES

La modelación de excavaciones por medio del método de elementos finitos, requiere precisión y detalle en la escogencia de los parámetros de entrada, ya que de esto depende la calidad de la información obtenida por medio del modelo.

El uso de los registros del piezocono para la determinación del perfil estratigráfico, permite una detallada descripción de la variación de las capas según la profundidad, aun así estos datos deben ser corroborados con ensayos de laboratorio.

La realización del Jet Grouting en la tercera etapa de construcción, ayuda como anclaje de los muro pantallas, disminuye las deformaciones en la losa de cimentación y mantiene la separación entre pantallas, debido a que producto de la excavación se producen desplazamientos que tienden a disminuir esta separación inicial.

Con la instalación de puntales y de la losa de vestíbulo, se disminuye las deflexiones en el muro pantalla, aun así, en esta profundidad se presentan los valores mayores de deflexiones, esta distancia corresponde a 0.1 a 0.2 veces la profundidad normalizada.

El valor máximo de deflexión máxima de los muros pantalla con influencia de carga de tránsito de una vía, y de edificación de 3 Niveles, corresponde a 18.8 mm a una profundidad de 8 m.

Debido a la influencia de la realización de la excavación profunda con la presencia de una vía que representa una carga de tránsito de 10 KN/m² y una edificación de 3 niveles 33kn/m², se presentan un valor máximo de asentamiento desde el borde de la excavación que corresponde a 39 mm.

REFERENCIAS

- [1] J. E. Moya, R. Salazar, G. A. Gómez y F. Salazar, *Excavaciones en Condiciones Complejas*, Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana De Ingeniería, 2014.
- [2] H. G. Kempfert and B. Gebreselassie, *Excavations and Foundations in Soft Soils*, Kassel, Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [3] E. E. Rodríguez Granados, “Ejemplos de aplicación del piezocono CPTu en proyectos en Colombia”, curso de exploración y caracterización del subsuelo con técnicas avanzadas. (7-9: 2015: Santa Fé de Bogotá D.C, Escuela colombiana de ingeniería), Memorias de curso de exploración y caracterización del subsuelo con técnicas avanzadas, 2015, pp. 1-90.
- [4] P. K. Robertson and K.L. Cabal Robertson, *Guide to cone penetration testing for Geotechnical Engineering*, 6ta ed. Signal Hill, California: Gregg Drilling & Testing, Inc., 2014.
- [5] Instituto de desarrollo urbano IDU, *Información Geotécnica PLBM Tramo IV* [En línea], http://app.idu.gov.co/seccion_metro_ASP/IntenasMain/primerLinea.asp.
- [6] C. A. Romero Porras, “Análisis de variación de esfuerzos durante excavaciones en suelos blandos”, M.S tesis, Cundinamarca, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C, Colombia, 2014.
- [7] D. A. Olaya, “Criterios Geotécnicos para el diseño de excavaciones en suelos blandos mediante el método de elementos finitos”, M.S tesis, Cundinamarca, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2015.
- [8] Alcaldía mayor de Bogotá, Decreto 523 de 16 diciembre, 2010 por el cual se adopta la microzonificación de Bogotá.
- [9] Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10, Capítulo A, requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente caracterización, Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010.
- [10] A. Nieto Leal, J. Camacho Tauta y E. Ruiz Blanco, “Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos”, *Revista de Ingeniería Universidad de Medellín*, Vol. 8, no. 15, pp. 75-91, Jul.-Dic., 2009.
- [11] T. Nghia Do, C. Yo Ou and R. Peng Chen, “A study of Failure Mechanisms of Deep Excavations in Soft Clay Using the Finite Element Method”, *Computers and Geotechnics*, vol. 73, pp. 153-163, Dic., 2015.
- [12] T. L. Gouw, “Common Mistakes on the Application of Plaxis 2D in Analyzing Excavation Problems”, *ResearchGate*, vol. 9, no. 21, pp. 8291-8311, Ene., 2014.
- [13] Plaxis, “Plaxis bv (Version 8) Materials models manual,” Delf, Países bajos, 2004.
- [14] P. K. Robertson and K.L. Cabal Robertson, “To Cone Penetration Testing”, *Curso De Exploración Y Caracterización Del Subsuelo Con Técnicas Avanzadas (7 - 9 Mayo, 2015: Bogotá D.C, Escuela colombiana de ingeniería)*. Memorias de curso de exploración y caracterización del subsuelo con técnicas avanzadas, 2015. 133p.