

**Análisis de deflexiones y asentamientos
en excavaciones profundas a cielo
abierto en suelos blandos de Bogotá**

Analysis of deflections and settlements in
deep excavations on soft soils of Bogotá

Rubby Vanesa Ballesteros Granados*

Carlos Javier Sainea Vargas **

Luis Alberto Cáceres Cárdenas***

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

* Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, posgrados en ingeniería, Colombia. Ingeniera Civil aspirante a Magister en Geotecnia. Investigador asociado al grupo de investigación en ingeniería sísmica y amenazas geo ambientales GISAG. *rubby.ballesteros@uptc.edu.co*

** Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de ingeniería civil, Colombia. Docente Asistente, Magíster en Ingeniería-Geotecnia, estudiante de Doctorado en Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia. *carlos.sainea@uptc.edu.co, cjsaineav@unal.edu.co*

*** Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de ingeniería civil. Colombia. Docente Asistente, Magíster en Ingeniería-Geotecnia. *luis.caceres@uptc.edu.co*

Correspondencia: Rubby Vanesa Ballesteros Granados. Avenida Central del Norte 39-115, 150003, Tunja, Boyacá, Colombia Tel. 0387401892.

Origen de subvenciones: Artículo derivado de la investigación del proyecto de grado del programa maestría en geotecnia titulado. Análisis de deformaciones en excavaciones a cielo abierto en suelos blandos de Bogotá, Instituciones participantes: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.

Resumen

La ejecución de excavaciones profundas puede generar efectos adversos como daños estéticos, funcionales y eventualmente el colapso en construcciones aledañas causados por movimientos excesivos del terreno; es por ello que estimar previamente las deflexiones en el sistema de contención y asentamientos en áreas vecinas es necesario para garantizar la seguridad de excavaciones durante el proceso constructivo. En este artículo se presentan los resultados de múltiples simulaciones numéricas de excavaciones profundas en 2D, adoptando el criterio de estados límites de servicio, que permiten evaluar su comportamiento en el proceso constructivo y con uso contemplado para líneas de transporte o sótanos de edificaciones. Los análisis se llevaron a cabo con diferentes sobrecargas, perfiles de suelos blandos, secuencias de excavación y espesores de elementos de soporte. Finalmente, con los resultados obtenidos se presentan herramientas gráficas que sirven para estimar deformaciones como las deflexiones en muros de contención y asentamientos del terreno que pueden ocurrir en proyectos de similares características.

Palabras claves: Deformaciones, Excavaciones profundas, Elementos finitos, Modelo Hardening Soil, Suelos blandos.

Abstract

The execution of deep excavations can generate adverse effects as aesthetic, functional damages and eventually collapse in surrounding constructions caused by excessive ground movements; because of that, the previous estimation of wall deflections and ground settlement in neighboring areas is needed to guarantee the excavations safety during the construction process. This paper presents the results of multiple numerical simulations of 2D deep excavations adopting the service limit states criterion, which allow to evaluate their behavior in the construction process and considering their use in transport lines or building basements. The analysis included different building loads, soft soil profiles, excavation sequences and thickness of support elements. Finally, with the obtained results, graphical tools are presented which are used to estimate deflections in retaining walls and Ground surface settlements that can occur in projects of similar characteristics.

Keywords: Deep excavations, Deformations, Finite Elements, Hardening Soil Model, Soft Soils.

Fecha de recepción: 17 de octubre de 2017
Fecha de aceptación: 24 de abril de 2018

INTRODUCCIÓN

La pérdida de confinamiento en el suelo durante el avance de los trabajos de excavación induce movimientos horizontales y verticales en el terreno; dichos movimientos pueden producir efectos adversos en las estructuras adyacentes, y es así como en la ciudad de Bogotá se han registrado recientemente algunos problemas relacionados con la ejecución de excavaciones en suelos blandos [1], [3]. La posible ocurrencia de daños en estructuras aledañas requiere de análisis con estimaciones razonables de dichos movimientos con el fin de tomar medidas encaminadas a evitarlos; dentro de estas medidas se encuentran la definición de un sistema de contención y la adecuada elección de procesos constructivos.

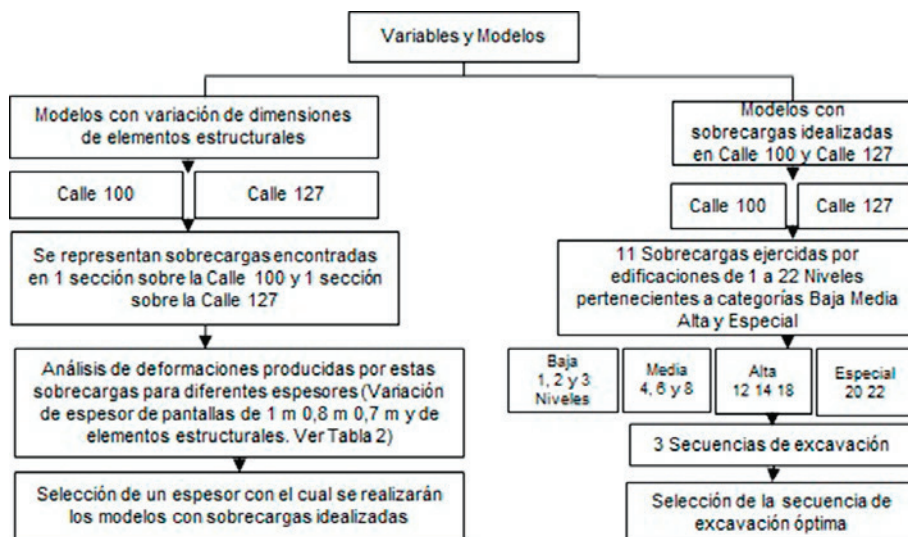
Para tal fin, en las últimas décadas fueron propuestos diferentes métodos empíricos y semiempíricos para la estimación de asentamientos en el terreno y deflexiones en los muros de contención [1], [2], [3]. Investigaciones más recientes hacen dichas estimaciones a partir de modelaciones numéricas empleando un software especializado, principalmente basado en el método de los elementos finitos, el cual permite representar aspectos como el comportamiento del suelo, la interacción suelo-estructura y simular secuencias de construcción [1], [4].

En el presente documento se emplea el método de elementos finitos para estimar la magnitud de las deflexiones generadas en el muro de contención y los asentamientos en superficie, al realizar excavaciones profundas en suelos blandos de la ciudad de Bogotá D.C.

METODOLOGÍA

El análisis del comportamiento de excavaciones en suelos blandos se llevó a cabo a partir de las deflexiones del muro y los asentamientos en el terreno próximo a estas, obtenidos por medio de modelaciones numéricas bidimensionales. La información del perfil de suelo y la geometría de la excavación se adoptaron de los estudios y diseños realizados para el tramo IV de la primera línea del metro de Bogotá [5]. En particular se usó la información de dos sectores: Calle 100 (k4+100) y carrera 9ª con calle 127 (k6+400). Respecto al sistema de contención, los espesores de los elementos estructurales, tales como muros pantalla, losa de cubierta, vestíbulo y cimien-

tación se modificaron tres veces; también se consideraron tres secuencias distintas de excavación y trece configuraciones diferentes de sobrecargas próximas a las excavaciones, dos de estas son semejantes a las encontradas en los sectores de las calles 100 y 127 y las once restantes representan una condición de sobrecarga idealizada para las cuales se varía la magnitud de la misma desde 11 kN/m² a 242 kN/m² para el área aferente a la excavación simulada en la calle 100 y calle 127. Los modelos elaborados se clasifican en dos grupos denominados “Modelos con variación de elementos estructurales” y “Modelos con sobrecargas idealizadas”. En los primeros se representa la magnitud y geometría de las sobrecargas que ejercen las construcciones encontradas en el sector escogido para la simulación de excavaciones sobre la calle 100 y calle 127; y en los segundos, se simulan sobrecargas que representan construcciones clasificadas según normativa [6], de categoría Baja entre 1, 2 y 3 niveles de construcción, Media de 4, 5 y 6 niveles, Alta de 12, 14, 18 niveles y Especial de 20 y 22 niveles como se muestra en la Figura 1. La magnitud de la carga (kN/m²) por nivel, se obtuvo realizando un avalúo de cargas, teniendo en cuenta el aporte de elementos estructurales, elementos no estructurales y carga viva, mediante una combinación básica de cargas que presenta la normativa vigente [6].



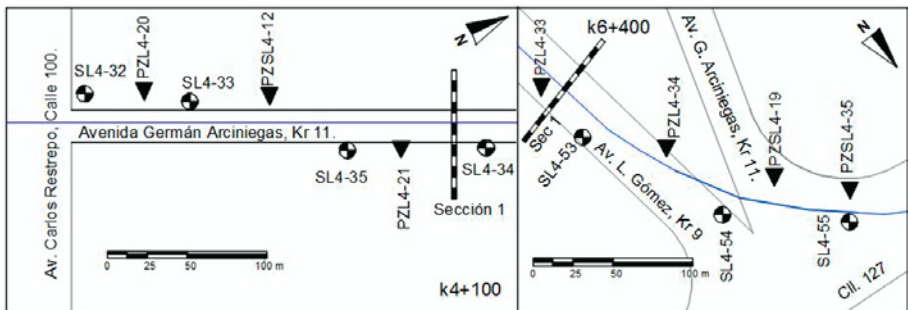
Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Metodología empleada

Localización

En la Figura 2a se presenta la localización del sector en el que se simularon las excavaciones de la calle 100. Adicionalmente, se presenta la nomenclatura y ubicación de la información disponible de sondeos (SL4-33, SL4-34, SL4-35, SL4-36) y registros de piezocono con medición de presión de poros CPTu (PZL4-20, PZL4-12, PZL4-21, PZL4-22). Se definió un perfil geotécnico representativo usando principalmente la información de los sondeos SL 4-35, SL4-36 y el Registro CPTU PZL4-24; este perfil se validó al compararlo con los demás perfiles de sondeos, resultados de ensayos disponibles y registros hallados en dicho sector.

La Figura 2b muestra el sector seleccionado en la calle 127. El perfil para el modelo geotécnico de este sector se obtuvo con el registro PZL4-35 y sondeo SL4-55, y se validó al compararlo con la información de los registros y/o sondeos PZL4-33, PZL4-34, Y SL4 53 SL4 54 SL4 55.

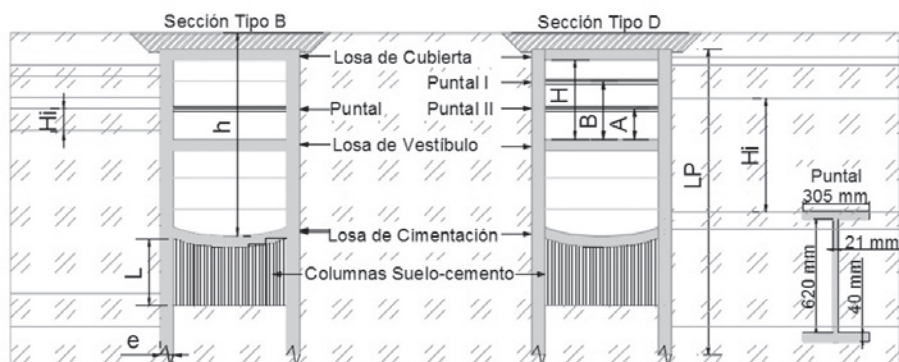


Fuente: [5].

Figura 2. Localización 2a) Perfil calle 100 2b) Perfil calle 127

Geometría de excavación y espesores de elementos estructurales

La Figura 3 presenta la geometría de la excavación cut & cover sección tipo B para la calle 100 y sección tipo D para la calle 127 [5]. Consiste en excavaciones con ancho de 12 m y profundidad “h” de 19,18 m; están conformadas por dos muros pantalla en concreto reforzado de 50 m de profundidad, losa de cubierta, losa de vestíbulo, losa de cimentación, puntales provisionales HEM600, los cuales se presentan en la Figura 3, y columnas suelo cemento con la técnica Jet Grouting tipo III. La separación entre losas, puntales y la variación de elementos estructurales se resumen en las Tablas 1 y 2.



Fuente: [5].

Figura 3. Sección cut & cover tipo B y D

Tabla 1. Dimensiones seleccionadas sección cut & cover

Cut & cover	Localización	H (m)	A (m)	B (m)	L (m)	Lp(m)
Tipo B	calle 100	7,35	2,94	NA	5,5	50
Tipo D	calle 127	7,35	2,94	5,1	7	50

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Variación de espesores de elementos estructurales

Variación	M. Pantalla	L. Cubierta	L. Vestibulo	L. Cimentación	
1	Espesor (m)	1	0,8	0,75	0,6
	EA (kN/m)	28 x 106	22 x 106	21 x 106	17 x 106
	EI (kNm ² /m)	2,3 x 106	1,2 x 106	0,98 x 106	0,5 x 106
	W (kN/m)	16,53	13,22	12,39	9,92
2	Espesor (m)	0,8	0,6	0,55	0,4
	EA (kN/m)	22 x 106	17 x 106	15 x 106	11 x 106
	EI (kNm ² /m)	1,2 x 106	0,5 x 106	0,39 x 106	0,15 x 106
	W (kN/m)	13,22	9,92	9,08	6,61
3	Espesor (m)	0,7	0,5	0,45	0,3
	EA (kN/m)	19 x 106	14 x 106	13 x 106	8,3 x 106
	EI (kNm ² /m)	0,79 x 106	0,29 x 106	0,21 x 106	0,063 x 106
	W (kN/m)	11,57	8,26	7,44	4,95

Fuente: Elaboración propia.

Condiciones de frontera y perfil promedio del suelo

Se establecieron fronteras en el modelo, equivalentes a dos veces la profundidad de muros pantalla en sentido vertical y dos veces en sentido horizontal desde el eje de simetría, según indica la literatura [7]; por ello, el perfil promedio de suelo alcanza la profundidad total de 100 m. Los primeros 50 m se caracterizaron teniendo cuenta las recomendaciones dadas en estudios previos realizados en la zona [5] y con el modelo de endurecimiento Hardening Soil, cuyos parámetros típicos se muestran en la Tabla 3. Dado que la información disponible [5] se limita a 50 m, para profundidades entre 50 m y 100 m, el suelo se caracterizó con base en información proveniente de otros organismos especializados [9] y su comportamiento se representó con el modelo Mohr - Coulomb. Las Tablas 4 y 5 presentan los parámetros del suelo empleados en la modelación y que fueron obtenidos del análisis de la información disponible para el sector de la calle 100 y calle 127 respectivamente.

Tabla 3. Parámetros modelo Hardening Soil

Descripción	Nomenclatura	Descripción	Nomenclatura
Peso unitario	γ kN/m ³	Rigidez tangente para carga primaria	$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ (MPa)
Cohesión	c' kPa	Rigidez secante en ensayos triaxiales	$E_{\text{50}}^{\text{ref}}$ (MPa)
Ángulo de fricción	Φ (°)	Rigidez en descarga y recarga	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (MPa)
Ángulo de dilatancia	Ψ (°)	Dependencia de la rigidez al estado de esfuerzos	m

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Perfil de la calle 100

Estrato	Hi (m)	γ kN/m ³	c' kPa	Φ (°)	Ψ (°)	$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ MPa	$E_{\text{50}}^{\text{ref}}$ MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ MPa	m
Estrato 1	3	14	10	20,1	0	28,18	28,18	84,55	0,5
Estrato 2	1	14	10	20,1	0	27,4	27,4	82,19	0,72
Estrato 3	2	13,9	10	20,1	0	25,02	25,02	75,07	0,72
Estrato 4	1	21,1	10	20,1	0	99,72	99,72	299,2	0,5
Estrato 5	2	14	10	25,1	0	5,04	5,04	15,13	0,89
Estrato 6	15	14,4	10	20	0	2,8	2,8	8,4	0,998
Estrato 7	3	14,4	10	22,3	0	1,5	1,5	4,51	0,93
Estrato 8	4	12,5	10	22,8	0	1,36	1,36	4,07	1
Estrato 9	3	13,3	10	22,4	0	1,31	1,31	3,92	0,95
Estrato 10	5	16	10	23,7	0	1,15	1,15	3,44	0,99
Estrato 11	2,5	14,9	10	25,3	0	3,29	3,29	9,87	0,74
Estrato 12	8,5	16,9	10	20,1	0	31,43	31,43	94,29	0,73

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Perfil de la calle 127

Estrato	Hi (m)	γ kN/m ³	c' kPa	Φ (°)	Ψ (°)	E_{oed}^{ref} MPa	E_{50}^{ref} MPa	E_{ur}^{ref} MPa	m
Estrato 1	2,2	14	10	20,1	0	28,18	28,18	84,55	0,5
Estrato 2	0,8	14	10	20,1	0	29,05	29,05	87,16	0,857
Estrato 3	3	13,5	10	27,6	0	9,47	9,47	28,42	0,857
Estrato 4	10,5	13,2	10	19,28	0	5,63	5,63	16,88	0,999
Estrato 5	1,5	13,2	10	20,5	0	5,28	5,28	15,84	1
Estrato 6	9	14,2	10	21,6	0	5,63	5,63	16,88	0,999
Estrato 7	6,5	11,8	10	24,7	0	3,48	3,48	10,45	0,845
Estrato 8	2	16	10	22,6	0	3,21	3,21	9,63	0,86
Estrato 9	8,5	16	10	26,6	0	57,54	57,54	172,6	0,5
Estrato 10	6	16	10	21,2	0	38,62	38,62	115,86	0,94

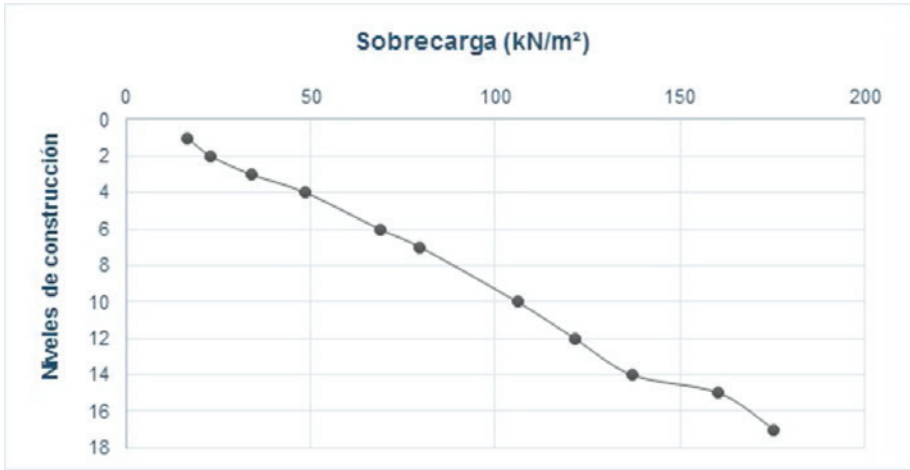
Fuente: Elaboración propia.

Sobrecargas

Las zonas aferentes se caracterizan por la presencia de edificaciones, áreas libres y vías.

Edificaciones

El valor de sobrecarga en kN/m² por nivel de construcción se determina a partir del aporte de cargas de elementos estructurales, no estructurales y cargas vivas; para tal fin se realizó un avalúo de cargas a una muestra de 11 edificaciones de diferentes niveles de construcción, y con los planos existentes se calculó la carga muerta con base en el aporte de elementos estructurales mediante la cubicación de concreto de elementos como losas, vigas, viguetas, columnas, pantallas y muros. Posteriormente se calculó la carga muerta de elementos no estructurales, tales como fachada, particiones de mampostería, afinado de piso y cubierta, y las cargas vivas se determinaron de acuerdo con el tipo de uso de las edificaciones; se combinaron las cargas y se mayoraron mediante una combinación básica tomada de la normativa vigente [6]. La Figura 4 muestra la magnitud de la sobrecarga según el número de niveles de construcción; el valor promedio de sobrecarga por un nivel de construcción en las 11 edificaciones tomadas como muestra se resume en la Tabla 6.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Sobrecarga por nivel de construcción

Tabla 6 . Sobrecarga por 1 Nivel de Construcción

# Niveles	1	2	3	4	6	7	10	12	14	15	17
Carga/nivel (kN/m²)	16	11	11	12	11	11	11	10	10	10	10

Fuente: Elaboración propia.

Con base en lo anterior, en la Ecuación 1 se muestra el valor promedio de sobrecarga por un nivel de construcción en las 11 edificaciones de referencia.

$$X = \frac{(10 + 10 + 10 + 10 + 11 + 11 + 11 + 11 + 11 + 12 + 16) \left(\frac{kN}{m^2}\right)}{11} = 11 \left(\frac{kN}{m^2}\right) \quad (1)$$

Es por ello que la magnitud de sobrecarga por nivel de construcción para las categorías de construcción descritas en los modelos corresponde a 11 kN/m² y se presentan en las Tablas 7 y 8.

Tránsito y zonas libres

Las vías con sobrecarga de tránsito, al igual que las zonas libres próximas a la excavación, se representaron como una sobrecarga distribuida de 15 kN/m², como se recomienda en los estudios realizados para la construcción de la primera línea del metro [5].

Tabla 7. Modelos con variación de elementos estructurales

Sección / calle	Distribución lado izquierdo.	Distribución lado derecho.
Sección 1/ 100	Edificio 2 niveles 22 kN/m ² , Vía 15 kN/m ²	Vía y zonas libres 15 kN/m ² , Edificio 8 Niveles 88 kN/m ²
Sección 1/ 127	Edificio 12 Niveles 132 kN/m ² , Vía y zonas libres 15 kN/m ²	Vía y zonas libres 15 kN/m ²

Fuente: Elaboración propia.

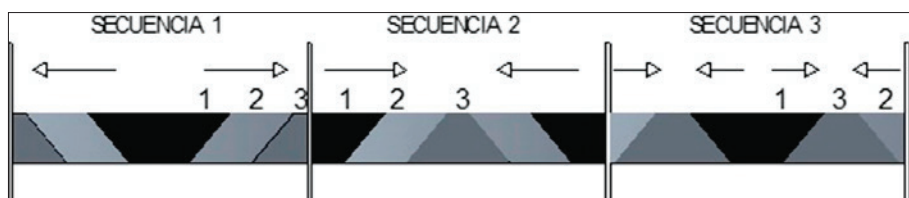
Tabla 8. Modelos con sobrecarga idealizada

Categoría	Baja			Media			Alta			Especial	
Niveles	1	2	3	4	6	8	12	14	16	20	22
Sobrecarga (kN/m ²)	11	22	33	44	66	88	132	154	176	220	242

Fuente: Elaboración propia.

Secuencia de excavación

La simulación del proceso constructivo se realizó por etapas con seis niveles de excavación; en cada uno de ellos el material fue removido de tal manera que a medida que avanzaba en la excavación se conformaban bermas. La Figura 5 presenta el procedimiento realizado para cada nivel de excavación con 3 secuencias distintas, la primera y la segunda son tomadas de fuentes académicas [4].



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 5a) Secuencia excavación 1, 5b) Secuencia 2, 5c) Secuencia 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de deflexiones totales en muros pantalla normalizados con el espesor del muro (ϵ/e) vs Profundidad normalizada con la profundidad total de excavación (z/h), y asentamientos

en zonas aledañas normalizadas con el espesor del muro (δ/e) vs distancia desde el borde de la excavación normalizada con la profundidad total (x/h) para la modelación de excavaciones descritas en la Figura 1. Las deflexiones y asentamientos están normalizados con el espesor de muros pantalla e ; para los modelos con variación de elementos estructurales, los espesores de muros pantalla son de 1 m, 0,8 m y 0,7 m. Los modelos con sobrecargas idealizadas se realizaron con espesor constante de elementos estructurales donde los muros pantalla son de 0,8 m. La profundidad z y la distancia desde el borde de excavación están normalizadas con la profundidad de excavación, la cual corresponde a $h = 19,18$ m.

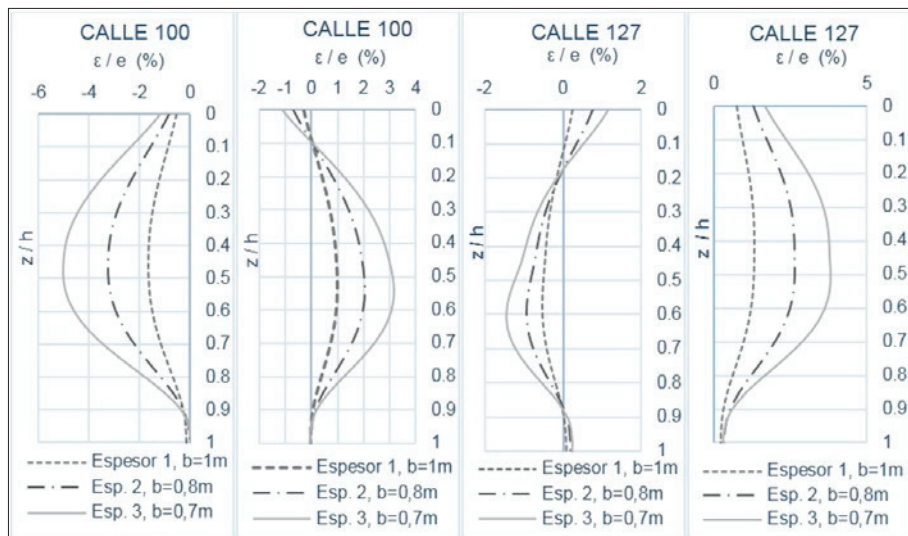
Modelos con variación de elementos estructurales

Deflexiones en muros pantalla con variación de elementos estructurales

Mediante seis modelos representados en una sección sobre la calle 100 y una sobre la calle 127, se evaluó la influencia de tres variaciones de espesores de elementos estructurales, los cuales se presentan previamente en la Tabla 2.

La Figura 6 presenta las curvas de deflexiones de muros pantalla izquierdo y derecho en la calle 100 y calle 127. Estas presentan un comportamiento patrón donde la deformación se restringe en la parte superior por la instalación de la losa de cubierta, son máximas en el nivel de excavación No 3, entre el puntal 1 y la losa de vestíbulo a una profundidad normalizada de 0,45; alcanza 16 mm para el muro pantalla derecho de la calle 100 implementando la variación de elementos estructurales 1, con la variación de elementos estructurales 2 alcanza 32 mm y con la variación de elementos estructurales 3 alcanza 50 mm de deflexión máxima. En total se logra reducir el 33 % y 51 % de deflexión máxima, implementando la variación de elementos estructurales 1, respecto a la variación 2 y la variación 3 de elementos estructurales.

Un comportamiento similar, independiente de la magnitud de la sobrecarga, se presenta en las simulaciones realizadas sobre la calle 127, donde las deflexiones se reducen 36 % y 54 %. Finalmente, las deflexiones alcanzadas en general se reducen por la presencia de las columnas suelo cemento.

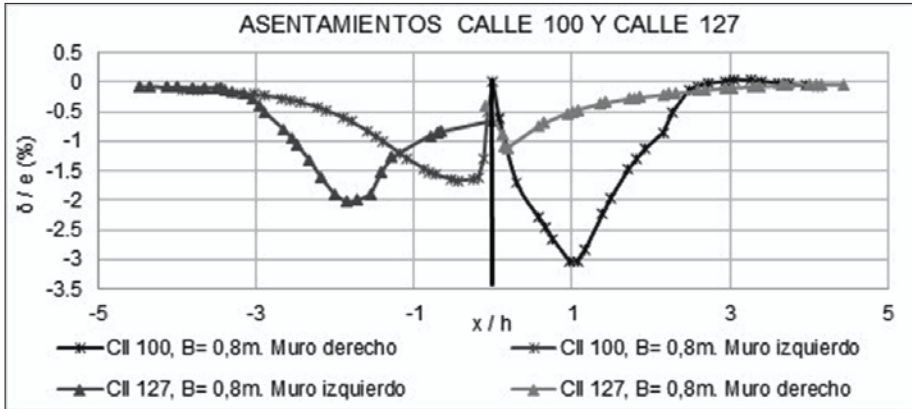


Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Deflexiones en muro pantalla para calle 100 y calle 127

Asentamientos en modelos con variación de elementos estructurales

La Figura 7 presenta la curva de asentamientos normalizados vs la distancia normalizada desde el borde de la excavación para las zonas aferentes izquierda y derecha sobre el perfil de la calle 100 y calle 127, con la variación de espesor de elementos estructurales 2 tomado de la Tabla 2, la cual tiene muros pantalla de $e = 0,8$ m. Sobre la calle 100 se presentan asentamientos máximos nominales de 13 mm en la zona donde se localiza una construcción de 2 niveles y 24 mm para la zona de localización de un edificio de 8 niveles. En la calle 127 se presentan asentamientos máximos nominales de 16 mm en la construcción de 12 niveles, y 7,2 mm para la construcción de 3 niveles. Los mayores valores de las curvas se obtienen en lugares donde la sobrecarga aumenta significativamente, como se puede apreciar cuando hay presencia de edificaciones de 12 y 8 niveles; se puede observar que como consecuencia del desconfinamiento generado por la excavación, la distancia a la excavación en la cual se aplican estas sobrecargas ejerce una importante influencia, ya que los asentamientos serán mayores en la medida en que dichas sobrecargas se encuentren más cerca a la excavación.



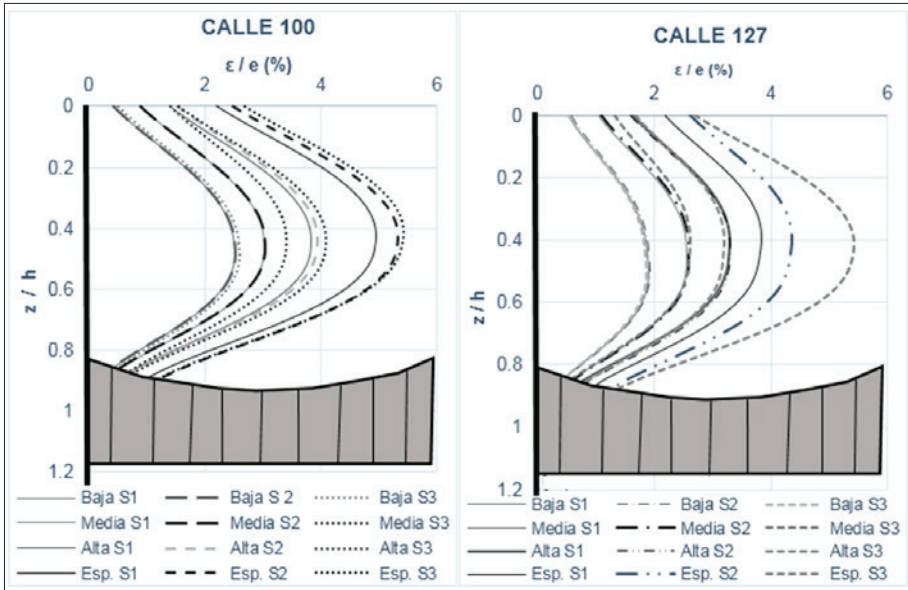
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Asentamientos calle 100 y calle 127

Modelos con sobrecargas idealizadas en calle 100 y calle 127

Secuencia de excavación

La Figura 8 presenta los resultados finales obtenidos al implementar tres secuencias de excavación distintas, para construcciones en zonas aledañas que representan las categorías Baja 22 kN/m^2 , Media 66 kN/m^2 , Alta 132 kN/m^2 y Especial 220 kN/m^2 sobre el perfil de la calle 100, y para las categoría Baja 22 kN/m^2 , Media 88 kN/m^2 , Alta 176 kN/m^2 y Especial 220 kN/m^2 sobre el perfil de la calle 127 de la Tabla 7. En los dos sectores se evidencia que de las tres secuencias propuestas en la Figura 5, la que presenta menores deflexiones en muros pantallas, independientemente de la magnitud de la sobrecarga aplicada en la zona aferente, corresponde a la secuencia de excavación 1, la cual está compuesta por bermas que se excavan desde el eje de simetría hacia los costados.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Secuencia de excavación 1, 2 y 3

Deflexiones en muros pantalla y asentamientos en zonas aferentes

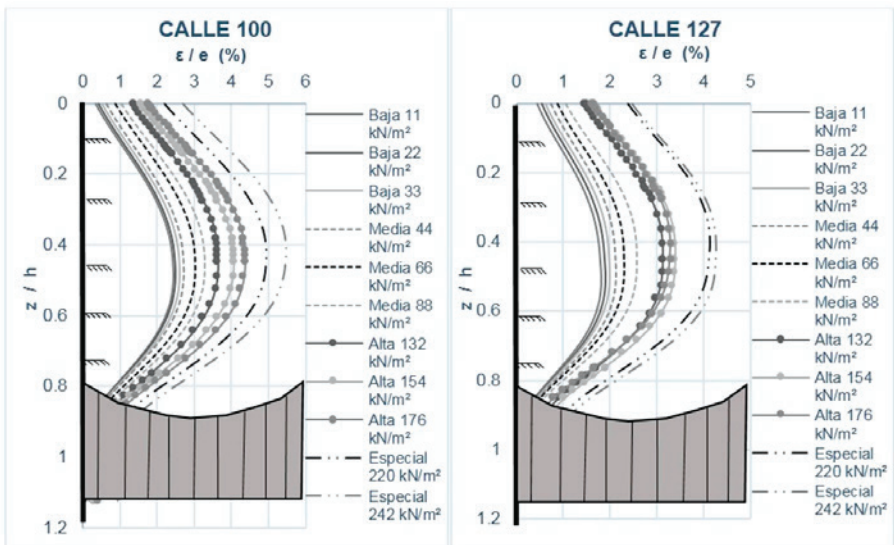
Con 22 modelos, 11 para la calle 100 y 11 para la calle 127, implementando la secuencia de excavación 1 considerada la más óptima, se evalúa el incremento de deflexiones en muros pantalla y asentamientos para cada unidad de construcción (Baja, Media, Alta y Especial).

La Figura 9 presenta los resultados de las deflexiones obtenidas con presencia de edificaciones pertenecientes a unidades de construcción Baja, Media, Alta y Especial. La tendencia de la curva de deflexiones muestra una restricción en el nivel superior por la instalación de losa de cubierta. Las curvas de deflexión son mayores para la excavación realizada en el perfil de la calle 100 respecto a la calle 127 y se aprecia que a mayor incremento de carga, la deflexión en el muro pantalla es mayor. Las deflexiones máximas se obtienen en nivel de excavación No 3 entre la instalación del puntal provisional y la losa de vestíbulo a una profundidad normalizada de 0,5 para construcciones de categoría Baja, a 0,45 en construcciones de categoría Media, a 0,43 en construcciones de categoría Alta y 0,40 en construcciones de categoría Especial, lo cual permite inferir que en la medida en

que el valor de la sobrecarga es mayor, las deflexiones máximas en muros pantalla se obtienen ligeramente más cerca de la superficie. Finalmente, las deflexiones alcanzadas en todos los casos se reducen por la instalación de las columnas suelo cemento.

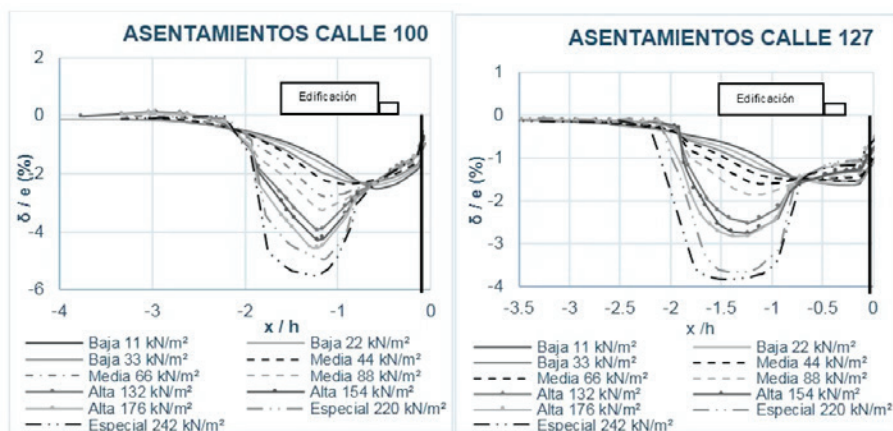
Los valores máximos nominales de deflexiones en calle 100, para construcciones de categoría Baja, son de 21 mm; en categoría Media, 29 mm; en Alta, 34 mm y en Especial, 44 mm. Por otra parte, en la calle 127 en las mismas categorías se presentan deflexiones máximas nominales de 16 mm, 20 mm, 26 mm y 34 mm, respectivamente.

La Figura 10 presenta la respuesta en superficie de estas deflexiones, traducidas en asentamientos para cada una de las construcciones idealizadas en las excavaciones simuladas sobre la calle 100 y calle 127. Sobre las excavaciones de la calle 100 se producen asentamientos máximos nominales de 20 mm, 26,1 mm, 35,8 mm y 44,1 mm para las construcciones que representan las categorías Baja, Media, Alta y Especial. Por su parte, las excavaciones sobre el perfil de la calle 127 presentan asentamientos máximos nominales de 12,9 mm, 14,7 mm, 22,5 mm y 30,4 mm en las mismas categorías.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Deflexiones calle 100 y calle 127



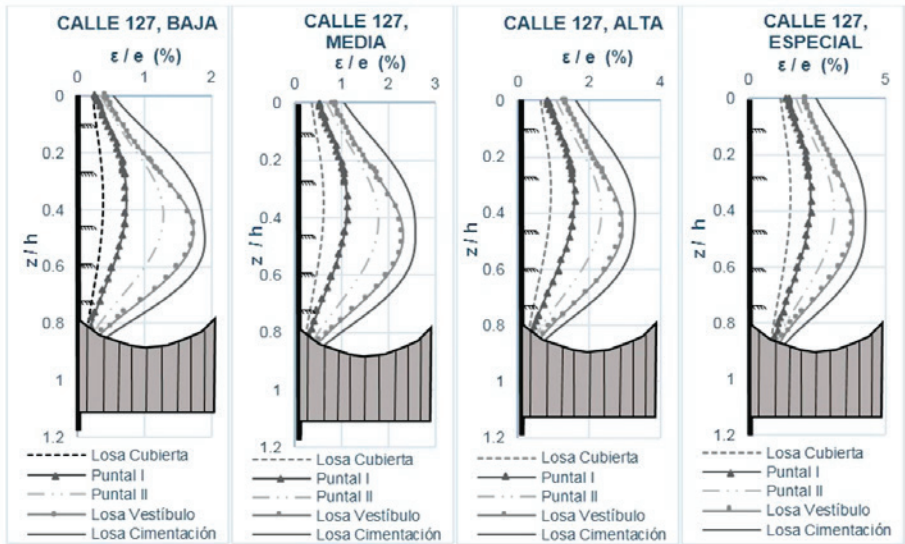
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Asentamientos calle 100 y calle 127

Excavación por etapas

Para conocer el comportamiento de las deflexiones en las etapas constructivas correspondientes a la instalación de elementos estructurales, como losas y puntales, se toma una muestra de los modelos realizados anteriormente; específicamente se toma el perfil de la calle 127 y sobrecargas de construcciones de las categorías Baja 33 kN/m², Media 44 kN/m², Alta 154 kN/m² y Especial 220 kN/m².

En la Figura 11 se observa que entre mayor es la sobrecarga encontrada en la zona aferente a la excavación, como es el caso de la Figura 11d, con influencia de sobrecarga Especial de 220 kN/m², las deflexiones máximas iniciales son mayores que para los muros pantalla de la Figura 11a donde en la vecindad de la excavación se encuentra la sobrecarga de categoría Baja de 33 kN/m², aun así, el aumento de las deflexiones máximas nominales con cada nivel de excavación de la Figura 11d es menor respecto al aumento por nivel de excavación que presenta en la Figura 11a.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Deflexiones por etapas a) Baja b) Media c) Alta y d) Especial

CONCLUSIONES

Al aumentar entre 20 cm y 30 cm al espesor de todos los elementos estructurales en concreto de la geometría cut & cover descrita, las deflexiones máximas normalizadas disminuyeron en 33% y 51% respectivamente.

Los asentamientos y deflexiones encontrados en las excavaciones simuladas en la calle 127 son menores que los de la calle 100, esto debido a que los parámetros mecánicos del suelo del perfil de la calle 127 presentan valores más altos, adicionalmente, la geometría de la excavación de la calle 127 incluye un perfil provisional adicional y columnas suelo cemento de mayor longitud.

Las curvas de deflexiones vs profundidad presentan un comportamiento típico independiente de la magnitud de carga, espesor de elementos estructurales, secuencia de excavación y perfil de suelo; estas muestran una restricción horizontal en el nivel superior por la instalación de la losa de cubierta, alcanzan un valor máximo en el nivel de excavación 3 entre la instalación del puntal y la losa de vestíbulo y finalmente las deflexiones

alcanzadas en general reducen por la instalación previa de columnas suelo cemento.

Las gráficas obtenidas permiten obtener una estimación previa de deflexiones en excavaciones compuestas por muros pantalla y asentamientos en áreas aferentes a la misma, en proyectos con condiciones similares a las estudiadas.

REFERENCIAS

- [1] J.E. Moya Barrios, R. Salazar Ferro, G.A. Gómez Agudelo y F. Salazar Ferro, "Problemas de estabilidad y deformación en excavaciones en suelos blandos," en *Excavaciones En Condiciones Complejas*, C. Salazar Perdomo, Ed. Bogotá, Col.: Escuela Colombiana De Ingeniería, 2014, pp. 11-77.
- [2] D. A. Olaya, "Criterios Geotécnicos para el diseño de excavaciones en suelos blandos mediante el método de elementos finitos," Tesis de Maestría. Dept. Ing. Civil., Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Col., 2015.
- [3] Á. J. González G, "Aplicación del índice de complejidad de excavaciones en Bogotá D.C.," XVI Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana, SCI, Bogotá D.C., 2012, pp. 15.
- [4] H. G. Kempfert & B. Gebreselassie, "Supported excavations in soft soil deposits," in *Excavations and foundations in soft soils*. Berlín Heidelberg, DE: Springer-Verlag, 2006, pp.117-267.
- [5] IDU Instituto de desarrollo urbano, (2015). *Diseño para la primera línea del metro en el marco del sistema integrado de transporte público SITP para la ciudad de Bogotá* [En línea]. Disponible: <https://webidu.idu.gov.co/jspui/handle/123456789/2432>.
- [6] *Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10*, Segunda actualización, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010.
- [7] K. J. Bakker, "A 3D FE model for excavation analysis" in *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground - proceedings of the 5th international conf. of TC28 of the ISSMGE*, London, UK, 2006, pp. 475.
- [8] *Reference Manual Plaxis 2D V8*, R.B.J. Brinkgreve Ed, Delft University of technology and Plaxis b.v., Delft, NL, 2004.
- [9] Fondo de prevención y atención de emergencia, (2010). *Estudio de zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones* [En línea]. Disponible:http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Suelo_Bogota/Zonificacion_Respuesta_Sismica-FOPAE-2010.pdf.