

Influencia de la heterogeneidad del suelo en las deformaciones del terreno sobre el frente de un túnel poco profundo: modelación centrífuga

Influence of Soil Heterogeneity on the Ground Deformations Above the Heading of a Shallow Tunnel: Centrifuge Modeling

GERMÁN FELIPE MUÑOZ ASCUNTAR*

RESUMEN

Con el propósito de entender la influencia de la heterogeneidad del suelo en las deformaciones del terreno sobre el frente de un túnel, se llevaron a cabo un grupo de ensayos en centrífuga en un arreglo espacial bidimensional de tres suelos. Estos ensayos incluyeron tres diferentes geometrías del frente del túnel, en términos de la longitud sin revestir. Así, para la fabricación de los suelos se empleó una combinación de caolín y bentonita en tres proporciones diferentes para obtener correctamente los valores fijados de límite líquido. Estos valores pretendieron simular la variabilidad espacial de la propiedad de límite líquido para una arcilla típica de la Formación Sabana en Bogotá. De este modo, fue empleado un método para simular campos aleatorios con el fin de generar diferentes realizaciones, lo cual requirió determinar la media, la desviación estándar y la longitud de correlación, así como el tamaño del espacio de discretización. Al final se realizó una comparación entre los modelos físicos al usar suelos heterogéneos y al emplear un valor promedio de límite líquido. Asimismo, una serie de modelos homogéneos permitió evaluar el asentamiento superficial del terreno entre los tres suelos empleados.

Palabras clave: campos aleatorios, túneles, asentamientos, límite líquido, modelación centrífuga.

ABSTRACT

In order to understand the influence of soil heterogeneity on ground deformation in front of a tunnel, a group of centrifuge tests on a two-dimensional spatial arrangement of three soils were carried out. These tests included three different geometries of the front of the tunnel in terms of the length uncoated. Thus, for the manufacture of soil, a mixture of kaolin and bentonite in three different proportions was used to obtain the correct set values of liquid limit. These values sought to simulate the spatial variability of the property of liquid limit for a typical clay from the Savannah Formation in Bogota. Thus, a method was employed to simulate random fields in order to generate different embodiments, which required to determine the average, the standard deviation and the correlation length, as well as the size of the space discretization. Finally, a comparison was made between the physical models when using heterogeneous soils and using an average value of liquid limit. Also, a number of homogeneous models allowed the evaluation of the ground surface settlement between the three soils used.

Keywords: Random fields, tunnels, settlements, liquid limit, centrifuge modeling.

FECHA DE ENVÍO: 2 DE AGOSTO DE 2011 • FECHA DE ACEPTACIÓN: 28 DE NOVIEMBRE DE 2011

* Ingeniero de diseño INGETEC S.A. Magíster en Ingeniería de la Universidad de los Andes. Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: gfmunoz84nv@hotmail.com

Introducción

El crecimiento mundial en infraestructura ha llevado a un importante incremento en el número y tipo de túneles construidos para vías, ferrocarriles y conducción de agua potable, así como aguas residuales. Actualmente, el ambiente más usual donde se desarrollan este tipo de proyectos son las grandes ciudades, destacando entre ellas Londres, México y Bogotá, en las que el grado de consolidación del suelo, combinado con la necesidad de obras subterráneas poco profundas, hacen necesario métodos especiales de excavación y estructuras de soporte.

A pesar del gran desarrollo tecnológico y de los sofisticados sistemas computarizados, que son implementados en las máquinas tuneladoras (las cuales hoy operan sobre el principio de un frente presurizado), la estabilidad de la excavación del frente y las deformaciones del terreno sobre el túnel durante el tiempo que transcurre hasta la instalación del soporte permanente, siguen siendo aspectos cruciales a tener en cuenta en el proceso de diseño y construcción de un túnel; es decir, si se excava con la técnica del Nuevo Método Austríaco (NATM). Autores como Mair (1979); Mair y Taylor (1997); Vermeer (2002) y Oblozinsky (2004), entre otros, han investigado los mecanismos de colapso en el frente de un túnel al emplear pruebas en centrífuga y análisis numéricos. Sin embargo, esos trabajos se han llevado a cabo en suelos homogéneos, despreciando la variabilidad inherente del suelo, la cual se debe a toda una serie de procesos geológicos que ocurren desde la formación del suelo y durante toda su historia. De esta manera, se muestra variabilidad espacial sobre sus propiedades físicas y de resistencia (Kim, 2005); por tanto, se llega a un concepto más realista sobre los suelos naturales: suelos heterogéneos.

La aplicación de métodos probabilísticos y estocásticos en ingeniería geotécnica permite introducir el concepto de heterogeneidad en un suelo. Dicha heterogeneidad suele presentar un comportamiento aleatorio, el cual en todo caso puede caracterizarse al emplear ciertos parámetros estadísticos. En la actualidad, la teoría de Random Fields constituye una de las mejores técnicas en diferentes áreas de la ciencia para reproducir sistemas desordenados y aleatorios al usar ciertas variables estadísticas. Vanmarcke (1984) introdujo toda la base teórica de los Random Fields; luego Baker (1984) la aplicó a los suelos con el desarrollo del método de las diferencias finitas para resolver una ecuación diferencial particular. Asimismo, Fenton y Griffiths (2008) ampliaron el uso de Random Fields a diversas aplicaciones prácticas en el área de la ingeniería geotécnica. Hoy en día la teoría de

Random Fields se constituye en una de las mejores herramientas para simular la variabilidad espacial en suelos.

No obstante, la aplicación particular de métodos probabilísticos a la ingeniería de túneles es escasa. Actualmente se destaca el trabajo de Gonnouni et ál. (2005), que al emplear el método de *Kriging* evaluaron la influencia que tiene la incertidumbre en el conocimiento de la variabilidad del suelo en la modelación numérica de asentamientos debidos a la excavación de túneles, todo esto con el propósito de estimar la posición media de las capas de suelo basados en ensayos de campo. Hu y Huang (2007) utilizaron cadenas de Markov para caracterizar de forma probabilística la incertidumbre de los estratos de suelo. Este método fue usado en un caso de estudio: "El túnel bajo el río Yangtse en Shanghai". El más reciente trabajo desarrollado por Garzón (2010), al usar la máquina centrífuga pequeña de la Universidad de los Andes, se enfocó en el comportamiento del asentamiento transversal sobre túneles en suelos arcillosos heterogéneos. A pesar de los pocos trabajos existentes en túneles, se evidencia un creciente interés en este campo de la ingeniería geotécnica.

Fabricación de suelos

Para la generación de los modelos aleatorios en esta investigación se adoptaron tres tipos de suelos, los cuales se construyeron con igual número de combinaciones de caolín y bentonita, a fin de asegurar un valor teórico de límite líquido. Estos minerales arcillosos, ampliamente usados en la industria, son aprovechados para la investigación con el fin de reducir las variaciones inherentes de una gran variedad de propiedades geotécnicas en suelos naturales. Sus principales minerales componentes son la caolinita y la montmorillonita. En cuanto a la propiedad de límite líquido, estos minerales arcillosos poseen propiedades contrastantes debido a las marcadas diferencias de superficie específica y capacidad de intercambio catiónico que presentan.

Para la elaboración de las mezclas de caolín y bentonita se revisaron los ensayos realizados por Grabowska y Olszewska (2003); Karunaratne (2001) y Misra (1996), que, con base en diferentes proporciones de caolín-bentonita, determinaron el comportamiento de la propiedad de límite líquido. En esta investigación se utilizaron arcillas colombianas, con las que se realizaron diferentes ensayos de límite líquido para seis combinaciones de caolín:bentonita de 100:0, 80:20, 70:30,

60:40, 40:60 y 30:70 por ciento. Con estas proporciones se construyó la curva que se presenta en la figura 1, la cual también presenta el promedio de los valores de límite líquido para diferentes proporciones de caolín: bentonita, al tenerse en cuenta los valores reportados por los autores ya mencionados.

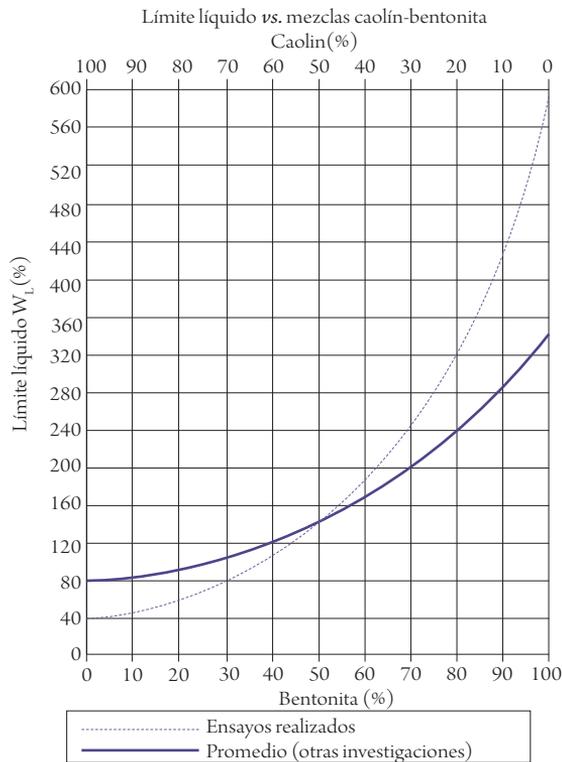


Figura 1. Valores de límite líquido para diferentes proporciones de caolín: bentonita

Fuente: elaboración propia.

Generación de Random Fields

Para la generación de las diferentes realizaciones de límite líquido a modelar físicamente se empleó un método conocido como Técnica de Descomposición Matricial, el cual permite generar campos bidimensionales de un parámetro introduciendo su media, desviación estándar, la distancia de correlación del parámetro y la definición de un vector asociado a unas coordenadas espaciales sobre las que se asignaría cada valor del parámetro generado. Este método fue desarrollado por El-Kadi y Williams (2000).

Los datos de entrada del método hicieron necesario definir, con base en lo reportado en la literatura, los valores más adecuados para la propiedad de límite líquido, teniendo en cuenta su representatividad de las arcillas lacustres presentes en la sabana de Bogotá. Los valores de coeficiente de variación COV (%) se obtuvieron de Gutiérrez (2006) y Lacasse y Nadim (1997) (tabla 1).

Tabla 1. Parámetros estadísticos de W_L para diferentes suelos

AUTOR	MEDIA (μ)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (σ)	COV (%)
Lacasse and Nadim (1996)	51,0	9,2	18,0
Schultze (1972)	55,1	12,2	22,1
Baghery (1980)	104,0	27,0	26,0
Leman Lake clay (Dysil 1976)	43,0	12,8	29,8
Libertad-Dolores clays, Gutiérrez (2006)	43,6	12,4	28,0

Fuente: Gutiérrez (2006).

Sustentado en estos valores se obtiene un promedio aritmético del coeficiente de variación del 24,78 %. Sin embargo, para los objetivos de esta investigación se adoptó un coeficiente de variación del 25 %. Para la selección de la media μ , se adoptó un suelo típico de la Sabana de Bogotá, teniendo en cuenta las perforaciones ejecutadas por Mendoza y Lizcano (2009) en el barrio El Polo. El perfil estratigráfico encontrado en esta perforación lo componen principalmente arcillas limosas con un líquido límite constante e igual a 140 %, como se ve en la figura 2.

Rodríguez (2009) realizó una gran cantidad de ensayos, incluido límite líquido cada 10 cm de profundidad sobre un perfil de 10 m, que le permitió obtener un amplio rango de variabilidad, con valores entre 100 % y 200 %. Al tenerse en cuenta ambas referencias mencionadas, una media (μ) de 140 % fue adoptada para la propiedad de límite líquido. Con este valor y el coeficiente de variación asumido se calculó un valor de desviación estándar del 35 %.

Según lo reportado por Lacasse y Nadim (1997), la función de distribución normal fue seleccionada como la más adecuada para modelar la propiedad de límite líquido. La distancia de autocorrelación fue adoptada de una extensa revisión bibliográfica llevada a cabo por Phoon (1999). De acuerdo con lo anterior, un valor de 5,2 m fue adoptado tanto para la fluctuación vertical como para la horizontal.

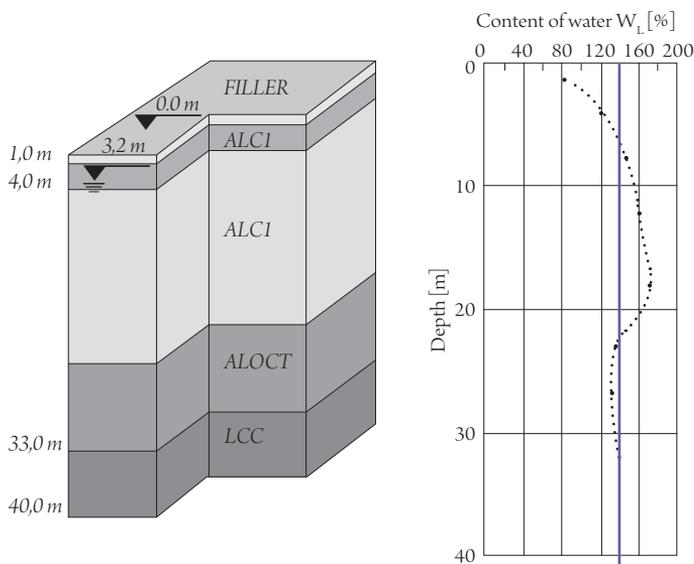


Figura 2. Perfil de límite líquido para un suelo típico de Bogotá

Fuente: Mendoza y Lizcano (2009).

Así, con estos parámetros ya definidos fue posible definir las tres proporciones de caolín: bentonita, con el fin de que se aproximaran a ciertos valores de límite líquido teóricos definidos para el modelo. Basados en los resultados obtenidos por los diferentes autores y en aquellos obtenidos por Garzón (2010) sobre arcillas industriales colombianas, se construyó una curva promedio, la cual se presentó en la figura 1. De este modo, la ecuación 1 ajusta la curva así:

$$w_L = 74,74e^{0,015x} \quad (1)$$

Siendo x la proporción de bentonita. Los ensayos efectuados con los materiales empleados en esta investigación permitieron definir la curva que se ajusta por medio de la ecuación 2:

$$w_L = 44,16e^{0,026x} \quad (2)$$

Considerando los parámetros estadísticos definidos con anterioridad, tres proporciones de caolín: bentonita fueron seleccionadas. Estos tres tipos de suelos se conformaron de acuerdo con dos criterios:

- El campo aleatorio en general tendrá una media μ de 140 % para la propiedad de límite líquido.
- El rango teórico de límite líquido estará entre $\mu + \sigma$ y $\mu - \sigma$, es decir, 105 % y 175 %.

Según esto, las proporciones para obtener dichos valores en relación con la curva promedio son las siguientes (tabla 2):

Tabla 2. Proporciones calculadas de caolín: bentonita

SUELO (#)	$W_{L\text{ OBTENER}}$ (%)	CAOLÍN (%)	BENTONITA (%)
1	105	77,3	22,7
2	140	58,1	41,9
3	175	43,3	56,7

Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de manejar proporciones de caolín y bentonita que facilitarán su manejo en laboratorio, se adoptaron las siguientes proporciones como las más próximas a los valores arriba calculados (tabla 3):

Tabla 3. Proporciones adoptadas de caolín: bentonita

SUELO (#)	CAOLÍN (%)	BENTONITA (%)	$W_{L\text{ OBTENIDO}}$ (%)
1	80	20	83,0
2	60	40	140,5
3	40	60	208,2

Fuente: elaboración propia.

La técnica de descomposición matricial fue programada en Matlab 9.0, la cual recibe como parámetros de entrada la media μ , la desviación estándar σ , la longitud de correlación L_T y el número de filas y columnas a emplear para asignar el valor aleatorio de límite líquido, de modo que solo generará realizaciones para espacios bidimensionales cuadrados.

Construcción de los modelos aleatorios

Para la fabricación y diferenciación de los suelos adoptados se utilizó mineral químico, asignando mineral color rojo al suelo tipo 2, color verde al suelo tipo 3, y sin mineral para el suelo tipo 1. El lodo se preparó con 1,4 veces el límite líquido. La combinación de los suelos se llevó a cabo en una batidora mecánica para luego ser almacenados en recipientes herméticos. Para el armado de los suelos se utilizaron pistolas de calafateo. Se definieron tiras de suelo de 1,0 x 1,0 cm de sección transversal, de tal modo que con catorce tiras se completaría el ancho de la caja para cada capa de 1 cm de altura. Adicionalmente, y con el fin de obtener la forma cuadrada de cada suelo vista en sección, se diseñó una rejilla en acetato de 0,5 mm de espesor, de trece divisiones de 1,8 cm de alto, teniendo en cuenta el asentamiento que sufriría el suelo debido a su posterior proceso de carga y, por consiguiente, consolidación. El empleo de la rejilla hacía necesario su elevación en una distancia de aproximadamente 1,8 cm a cada finalizado de capa. La figura 3 expone el proceso de llenado de un modelo.



Figura 3. Armado de un modelo heterogéneo

Fuente: elaboración propia.

El proceso de llenado se llevó a cabo en tres etapas, es decir, se llenaban alrededor de tres capas y se cargaba hasta 12 o 15 kg en un consolidómetro neumático. Acto seguido, se paraba la carga y se continuaba con tres capas adicionales de suelo, se cargaba nuevamente y se llevó a cabo la tercera capa. Finalizada esta capa se

procedía a cargar el suelo hasta llevarlo a 50 kPa, usando un consolidómetro neumático automatizado con el método de Asaoka (1978). Este método permite comparar el asentamiento un delta de tiempo antes con el actual asentamiento, a fin de hacer incrementos de carga sucesivos hasta alcanzar el 100 % de la consolidación.

Finalizada la consolidación se desmonta el modelo y se efectúa la excavación del túnel. Para esto se diseñaron dos guías y una pala cortadora con media sección del túnel. La figura 4 muestra los aditamentos diseñados para una correcta excavación del túnel.

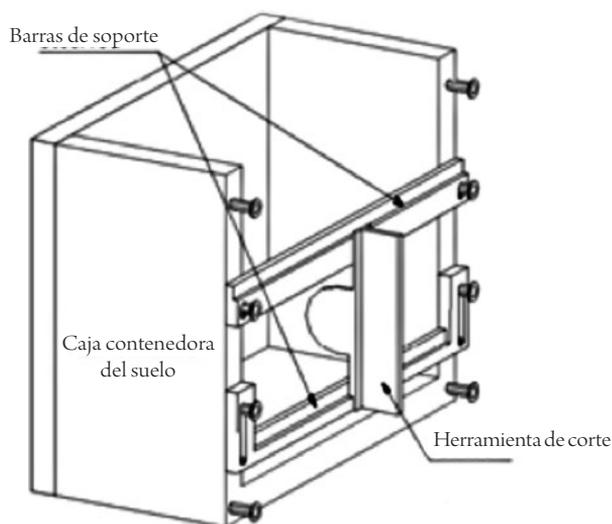


Figura 4. Aditamentos empleados para la excavación del túnel

Fuente: elaboración propia.

La excavación del túnel consideró la simetría del modelo, por lo cual se excavó media porción de túnel. La escala del modelo fue definida buscando el mayor diámetro de túnel, siempre que la distancia del borde de la caja al frente de este no fuera menor de dos veces el diámetro como sugiere Taylor (1995), por lo que se busca, de esta manera, localizarlo en la parte central del modelo. Previo al llenado, las paredes de la caja se engrasaron para reducir los efectos de borde. Con base en lo anterior, la escala del modelo fue definida en 160, de tal manera que correspondiera a un túnel en el prototipo de 4 m de diámetro. Además del diámetro D se definieron otras dimensiones como la cobertura C y la longitud sin revestir P , las cuales se detallan en la figura 5.

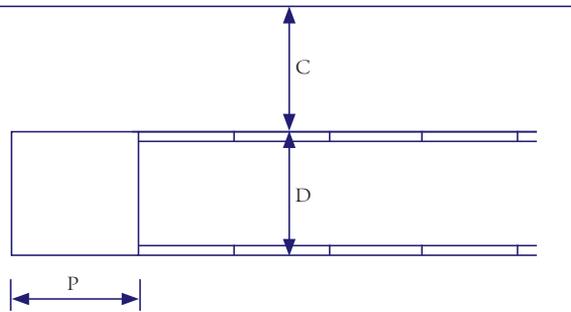


Figura 5. Dimensiones geométricas empleadas en los modelos

Fuente: Mair (1979).

Con el objetivo de conocer la variación de la deformación en función de la longitud sin revestir P , se adoptaron tres valores de P que hacen uso de la relación adimensional P/D , siendo estos 0, 1,0 y 1,5. La profundidad del túnel fue definida en términos de la relación adimensional C/D , adoptándose un valor constante de $C/D = 2,0$.

El revestimiento se modeló con un semitubo de lámina de latón de 0,5 mm de espesor, de tal forma que reemplazará el suelo, dicho espesor se calculó con base al peso del suelo removido, obteniéndose una diferencia próxima al 7 %.

Ensayos en centrífuga

En total se llevaron a cabo dos series de ensayos. La serie A compuesta por nueve ensayos homogéneos, tres para cada tipo de suelo y las tres relaciones de P/D definidas. Y la serie B compuesta por nueve ensayos heterogéneos para diferentes realizaciones de la propiedad de límite líquido y llevando a cabo tres modelos por cada relación P/D . Los ensayos realizados se resumen en la tabla 4.

Para evaluar los asentamientos superficiales y subsuperficiales se emplearon puntos de marcación sobre la cara frontal del modelo. Por la cantidad de modelos a ensayar, se escogió la centrífuga pequeña del laboratorio de modelos geotécnicos de la Universidad de los Andes. Las principales características de este equipo se presentan en la tabla 5.

Tabla 4. Resumen de ensayos ejecutados

SERIE	ENSAYO	P/D	SUELO
A	1	0	1
	2	1,0	1
	3	1,5	1
	4	0	2
	5	1,0	2
	6	1,5	2
	7	0	3
	8	1,0	3
	9	1,5	3
B	11	0	Aleatorio
	12	0	Aleatorio
	13	0	Aleatorio
	14	1,0	Aleatorio
	15	1,0	Aleatorio
	16	1,0	Aleatorio
	17	1,5	Aleatorio
	18	1,5	Aleatorio
	19	1,5	Aleatorio

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Características de la centrífuga pequeña

DIMENSIONES	L (CM)
Distancia eje-plataforma	56,50
Longitud del rotor	150
Diámetro sala de centrifugación	170
Longitud plataforma del modelo	70
Largo plataforma	17,50
Altura libre	13,50
RENDIMIENTO	VALORES
Máxima masa del modelo	4000 g
Aceleración máxima (4000 g)	400 G
Potencia nominal	3 HP

Fuente: Garzón (2010).

La figura 6 muestra un modelo aleatorio montado sobre la plataforma de la centrífuga. La prueba en centrífuga se llevó a cabo en un tiempo aproximado de tres minutos, llevando gradualmente cada modelo hasta las 160 gravedades. Finalizado cada vuelo se efectuaron ensayos de veleta en diferentes puntos, con el fin de obtener la resistencia al corte no drenada del suelo (S_u).

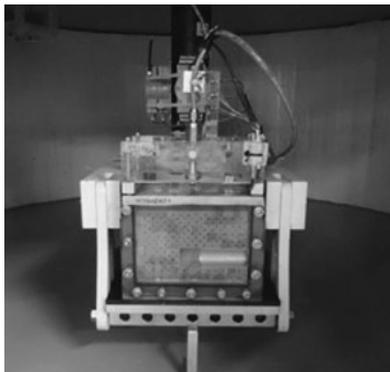


Figura 6. Modelo heterogéneo antes del inicio de la prueba en centrífuga

Fuente: elaboración propia.

Resultados obtenidos

Los análisis de deformaciones y asentamientos superficiales se realizaron con base en los desplazamientos de los puntos de marcación iniciales y los posteriores vectores de desplazamientos trazados sobre la cara lateral de modelo. La figura 7 muestra el mecanismo de falla durante el tiempo para el modelo heterogéneo 9.

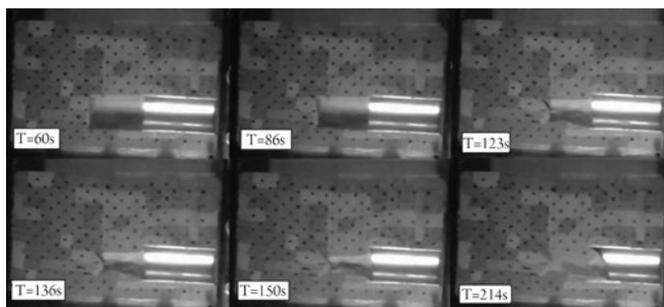


Figura 7. Mecanismo de falla para el modelo heterogéneo 9

Fuente: elaboración propia.

En los modelos homogéneos es claro el efecto del tipo de suelo en las deformaciones por encima del frente del túnel. En general se encuentra que los modelos con relación $P/D = 1,5$ presenta mayor proporción de vectores de desplazamientos hacia el eje del túnel, es decir, un mecanismo bidimensional. Por otro lado, modelos con relación $P/D = 0$ presentan vectores de desplazamientos en frente de la cara del túnel mayormente paralelos al eje de este y sobre dicho suelo verticales, lo cual hace evidente la existencia de un mecanismo de falla completamente tridimensional. Por su parte, los modelos con relación $P/D = 1,0$, presentan una combinación de ambos mecanismos ya mencionados; los modelos heterogéneos presentan resultados más complejos. Aquí es evidente la influencia del tipo de suelo justo adelante del sector revestido. Las figuras 8, 9 y 10 presentan los vectores de desplazamiento para los nueve modelos heterogéneos ensayados. Similares esquemas fueron trazados para los modelos homogéneos. Por ejemplo, los modelos heterogéneos con distancia sin revestir o $P/D = 0$ mostraron un mecanismo de falla similar en los modelos 1 y 3, siendo este caracterizado por un flujo de suelo dentro del túnel revestido. Sin embargo, en el modelo 2 el flujo no fue tan significativo como en los otros dos. Esto está relacionado con la resistencia al corte no drenada del suelo, S_u , la cual para el suelo 2 fue de 29.2 kPa. El asentamiento superficial también fue inferior a los otros dos modelos.

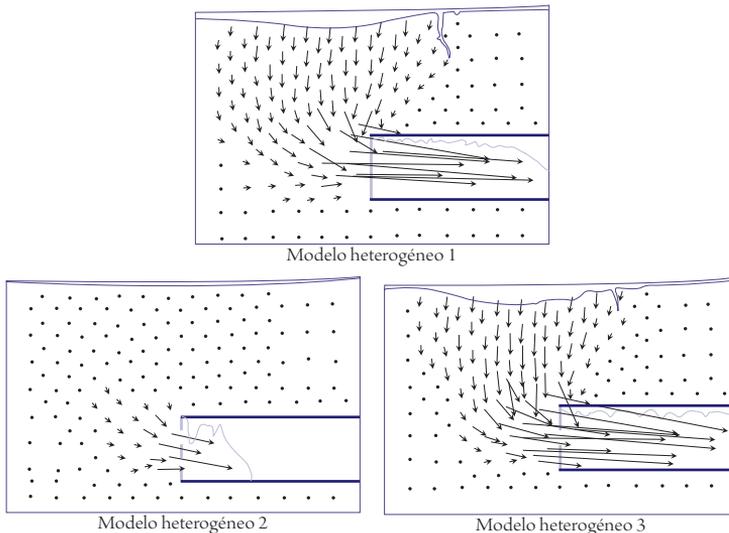
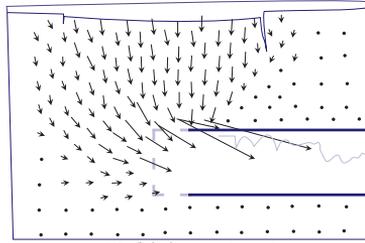
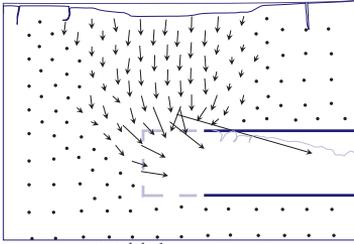


Figura 8. Vectores de desplazamiento para modelos heterogéneos con $P/D = 0$

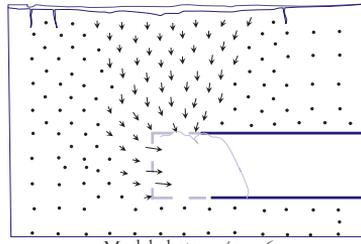
Fuente: elaboración propia.



Modelo heterogéneo 4



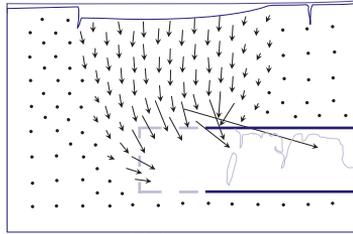
Modelo heterogéneo 5



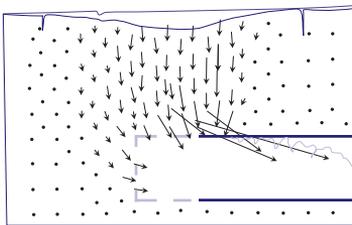
Modelo heterogéneo 6

Figura 9. Vectores de desplazamiento para modelos heterogéneos con $P/D = 1,0$

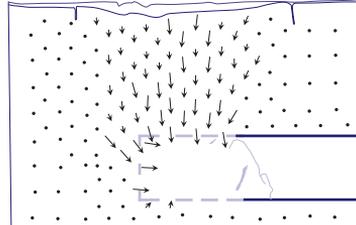
Fuente: elaboración propia.



Modelo heterogéneo 7



Modelo heterogéneo 8



Modelo heterogéneo 9

Figura 10. Vectores de desplazamiento para modelos heterogéneos con $P/D = 1,5$

Fuente: elaboración propia.

La influencia del tipo de suelo fue evaluada por medio de gráficas de asentamiento superficial frente a la distancia horizontal del modelo. Los resultados son

coherentes: el suelo tipo 1, el cual tiene una menor proporción de bentonita, presenta deformaciones menores que los suelos tipo 2 y 3. Por su parte, el suelo tipo 3, el cual tiene mayor contenido de bentonita, presentó las mayores deformaciones. Otra importante influencia es el ancho del cuenco de asentamiento generado por la excavación del túnel: modelos con menor proporción de bentonita mostraron un perfil de asentamiento más ancho que los modelos con mayor contenido de bentonita, el cual fue más angosto. La figura 11 muestra los resultados de asentamiento superficial para los modelos homogéneos.

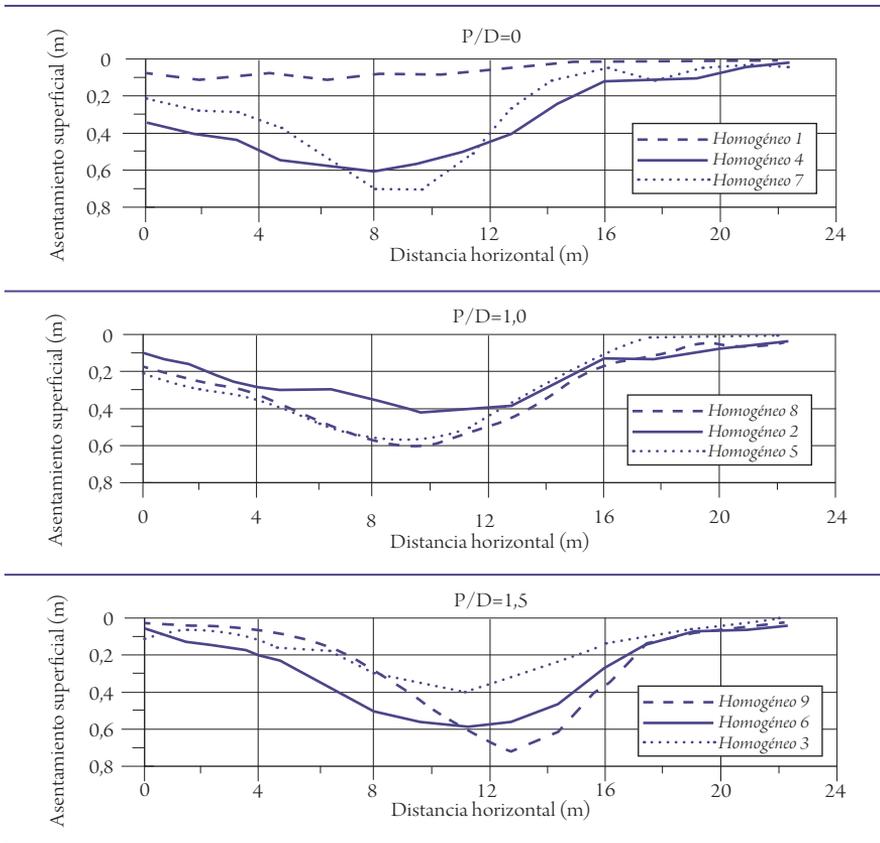


Figura 11. Asentamiento superficial para los modelos homogéneos

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, los resultados de los modelos homogéneos se compararon con los heterogéneos. La figura 12 muestra el asentamiento superficial para cada relación de P/D tomando en cuenta tres casos: una serie de tres realizaciones para la propiedad del límite líquido, un segundo caso con la media del límite líquido

correspondiente al suelo tipo 2 y un tercer caso considerando la media de los resultados de los modelos aleatorios. Asimismo, la figura 12 muestra que el perfil de asentamiento longitudinal para la media de los modelos aleatorios es mayor que el perfil para un suelo homogéneo, pero cercano a este. Una excepción a esto ocurre con la media de los modelos aleatorios para el caso de $P/D = 1,5$, la cual fue menor que la mostrada por el suelo tipo 2. Esta gráfica muestra también la ocurrencia de ligeros saltos o discontinuidades en el perfil para los modelos heterogéneos, a diferencia de los modelos homogéneos, los cuales presentaron un perfil en general continuo.

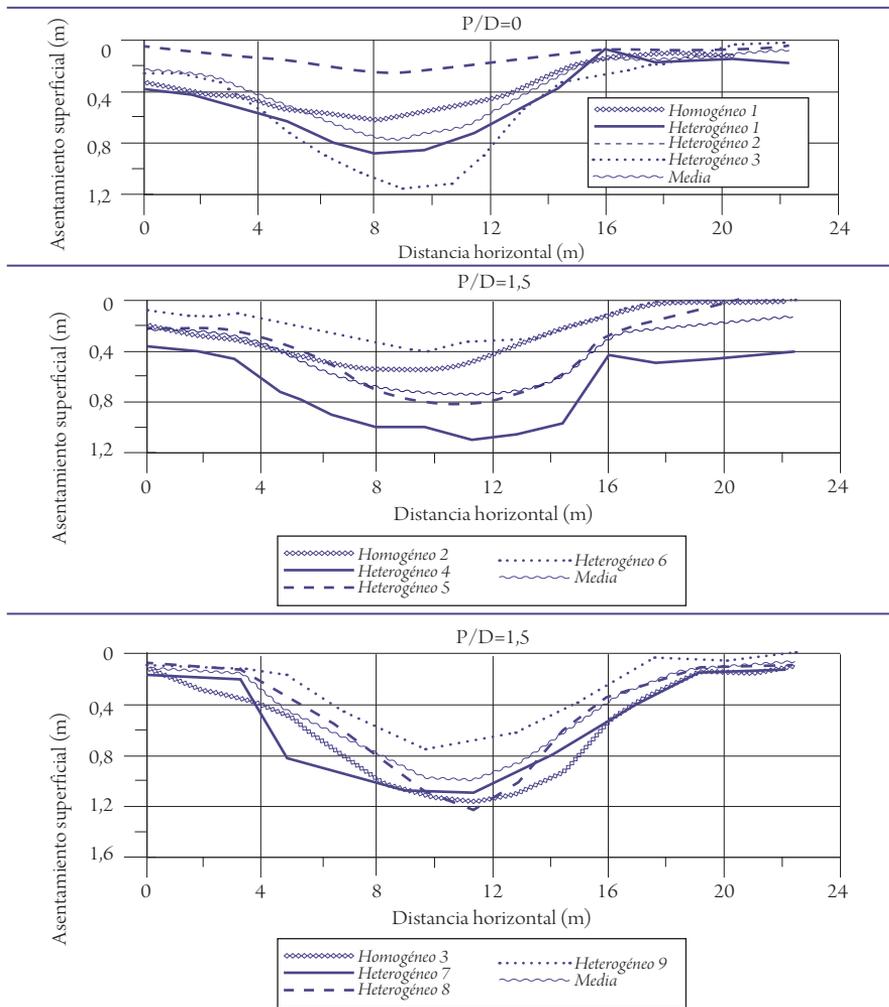


Figura 12. Comparación del asentamiento superficial para modelos homogéneos y heterogéneos

Fuente: elaboración propia.

Análisis adicionales de asentamiento subsuperficial a profundidades de $C/D = 0,4$, $C/D = 0,8$, $C/D = 1,2$ y $C/D = 1,6$ se llevaron a cabo obteniéndose mayores asentamientos en los modelos heterogéneos que los presentados en los modelos homogéneos.

Conclusiones

Con la intención de entender los mecanismos de deformación que ocurren sobre el frente de excavación de suelos heterogéneos, una serie de ensayos fueron llevados a cabo en máquina centrífuga, comparando los resultados obtenidos con las deformaciones sobre modelos homogéneos. Para estos análisis, se concluyó lo siguiente:

- Las deformaciones en los modelos heterogéneos mostraron un perfil longitudinal con ligeros saltos o discontinuidades, lo cual está relacionado precisamente con las diferencias en magnitud de la resistencia al corte no drenada de cada suelo, lo que a su vez está asociado con los tres límites líquidos diferentes adoptados en este trabajo. Asimismo, diferencias máximas de asentamiento, entre los modelos homogéneos y heterogéneos de hasta 0,82 m, 0,76 m y 0,87 m, se obtuvieron para las configuraciones geométricas de P/D igual a 0, 1,0 y 1,5, respectivamente.
- Los modelos homogéneos permitieron corroborar el efecto de tener altas proporciones de bentonita en un suelo, lo cual se traduce en mayores deformaciones a medida que el porcentaje de bentonita se incrementa.
- Los suelos heterogéneos mostraron un comportamiento más crítico, por un lado, con respecto al asentamiento superficial, y por el otro, subsuperficial para las longitudes de túnel sin revestir. Esta investigación permitió concluir que si se considera la propiedad física del límite líquido, la representación del suelo como un material homogéneo con un simple promedio de dicha propiedad, puede llegar a ser desventajosa. Por tanto, un diseño más realista se puede alcanzar introduciendo la variabilidad espacial del suelo.
- Los vectores de desplazamiento trazados para todos los modelos, mostraron la influencia de la longitud no revestida del túnel en el tipo de mecanismo de falla a presentarse: un mecanismo completamente tridimensional se observó

cuando se uso un túnel completamente revestido, es decir, con una relación $P/D = 0$; por otro lado, un mecanismo de falla bidimensional se logra cuando el frente del túnel tiene una longitud no soportada mayor que 1,5 diámetros, en este caso aplica un mecanismo de deformación plana, lo cual fue también confirmado en modelos heterogéneos. Sin embargo, se observó que la localización de un suelo de menor resistencia justo adelante o por encima del frente del túnel, puede contribuir de manera considerable con desplazamientos adicionales paralelos al eje del túnel.

- Un mayor número de realizaciones requieren ensayarse con el fin de alcanzar resultados que sean concluyentes, los cuales impliquen formular conceptualizaciones más fuertes sobre la influencia de la heterogeneidad del suelo en las deformaciones superficiales y subsuperficiales.

Referencias

- Akira, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations*, 18(4).
- El-Kadi y Williams (2000). Generating two-dimensional fields of autocorrelated, normally distributed parameters by the matrix decomposition technique. *Groundwater*, 38(4).
- Fenton y Griffiths (2008). *Risk assessment in geotechnical engineering*. Nueva Jersey: Wiley.
- Gonnouni, M.; Riou, I. y Hicher, P. (2005). Geostatistical method for analysing soil displacement from underground urban construction. *Géotechnique*, 55(2).
- Grabowska y Olszewska (2003). Modeling physical properties of mixtures of clays: an example of a two component mixtures of kaolinite and montmorillonite. *Applied Clay Science*, 22.
- Gutiérrez, A. (2006). Determination of Atterberg limits: Uncertainty and Implications. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*. ASCE, 132(420).
- Hu y Huang (2007). *Underground space - the 4th dimension of metropolises*. Taylor and Francis Group.
- Hyunki, K. (2005). *Spatial variability in soils: stiffness and strength* [PhD thesis]. Atlanta: Georgia Institute of Technology.
- Karunaratne, G. P., Lee, S. L.; Chew, S. H. y Sinha, A. N. (2001). Bentonite: kaolinite clay liner, *Geosynthetics International*, 8(2).
- Garzón, L. X. (2011). *Modelación en centrifuga de túneles poco profundos con variación espacial del suelo* [tesis de maestría]. Bogotá: Universidad de los Andes.

- Lacasse y Nadim (1997). Uncertainties in characterizing soil properties. *Norwegian Geotechnical Institute*, 201.
- Mair (1979). *Centrifugal Modeling of Tunnel Construction in Soft Clay* [PhD thesis], Cambridge: University of Cambridge, United Kingdom.
- Mairy Taylor (1997). Bored tunneling in the Urban Environment, state of the art and theme lecture. In *Proceedings of 14th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, 4, 2353-2385. Hamburg, Balkema.
- Mendoza y Lizcano (18 al 20 de octubre del 2009). Comportamiento mecánico de la arcilla de Bogotá. En *XV Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Misra; Becker; Jiang y Usnik (1996). Properties of known kaolinite and montmorillonite mixtures. En *Environmental Geotechnology. Proceedings of the third International Symposium on Environmental Geotechnoloy*. Lancaster: Technomic Publishing Company.
- Oblozinsky y Kuwano (2004). Centrifuge experiments on stability of tunnel face. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 3.
- Phoon y Kulhawy (2002). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4).
- Baker, R. (1984). Modelings oil variability as a Random Field. *Mathematical Geology*, 16(5).
- Rodríguez, J. (del 18 al 20 octubre del 2009). Variabilidad de las propiedades geotécnicas de la Formación Sabana. *XV Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Taylor, R. N. (1995). *Geotechnical Centrifuge Technology*. Blackie Academic and Professional.
- Vanmarcke, E. H. (1983). *Random Fields: Analysis and synthesis*. MIT Press, Cambridge, M. A.
- Vermeer; Ruse y Marcher (2002). Tunnel heading stability in drained ground. *Felsbau, Rock and soil engineering*, 20(6).

