

ANÁLISIS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA PARA REFUERZO DE SUELOS FISURADOS*

*Jorge Alberto Rodríguez Ordoñez**

Resumen: se presentan los resultados de un análisis de interacción suelo-estructura realizado para el diseño de una cimentación en arcillas blandas fisuradas de la Sabana de Bogotá. El sistema de cimentación analizado consiste en una estabilización y en un refuerzo del suelo mediante inclusiones de suelo con cemento y cal. Se evaluó el efecto de las inclusiones sobre la capacidad portante y las deformaciones, teniendo en cuenta la presencia de grietas abiertas y fisuras presentes en el suelo debido a desecación. Los análisis se hicieron mediante un modelo axisimétrico de elementos finitos para modelar el suelo y las inclusiones rígidas. Los datos para los análisis se obtuvieron del estudio de suelos realizado, como parte del proyecto para una subestación eléctrica de alta capacidad, la cual está localizada en el municipio de Tenjo, Cundinamarca. Los resultados de los análisis son consistentes con las observaciones realizadas de la problemática de los suelos fisurados en el área y plantean una metodología de análisis y diseño para alternativas eficientes de cimentación en estos suelos fisurados.

Palabras clave: interacción suelo-estructura, suelos fisurados, elementos finitos.

Abstract: the paper presents results of soil-structure interaction analysis for foundations on soft fissured clay in the Bogotá Sabana. A foundation system based on soil-cement-lime columns used as soil reinforced was considered. An axisymmetric finite element model was used to represent the soil inclusions as well as the open cracks and fissures present in the soil due to desiccation. The effects of the soil inclusions on bearing capacity and deformations were studied. Soil data was obtained from a soils study carried out for a large electrical sub-

* Fecha de recepción: 30 de junio de 2005. Fecha de aceptación para publicación: 8 de noviembre de 2005.

** Ingeniero civil, Universidad Nacional de Colombia, Master of Science in Civil Engineering, University of North Carolina, Phd in Civil Engineering, North Carolina State University. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: rodriguezja@javeriana.edu.co.

station located in Tenjo, Cundinamarca. The results are consistent with the observed behaviour of the fissured soils in the region. The methodology developed is suitable for analysis and design of efficient foundation alternatives on fissured soft soils.

Key words: Soil-Structure Interaction, Fissured soils, Finite Elements.

1. INTRODUCCIÓN

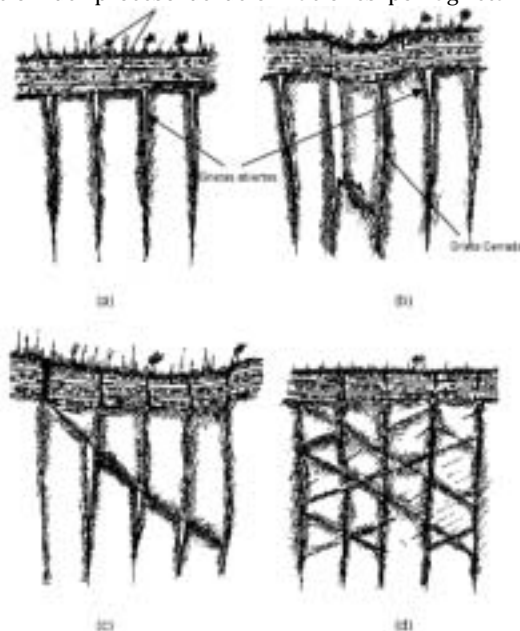
La Sabana de Bogotá está formada superficialmente por depósitos de suelos arcillosos y limosos de origen lacustre. En el sector occidental de la Sabana (municipios de Cota, Tenjo, Chia, Funza y Mosquera) el terreno, en general, se encuentra cubierto de pastos y de árboles que demandan humedad del suelo y el balance hídrico indica que se puede presentar un efecto de desecación por pérdida de humedad hacia la atmósfera. La posición del nivel freático muestra una profundidad del orden de 5 a 7 m, nivel hasta el cual ha progresado el efecto de la desecación. Dado que se trata de suelos arcillosos con altos contenidos de humedad y relación de vacíos, al desecarse regionalmente se producen grietas generalizadas de alta intensidad sobre toda el área. Las exploraciones con apiques en el sitio indican que la separación típica de las grietas es del orden de 30 cm y, aproximadamente una de cada tres está abierta del orden de 5 cm. Esto da lugar a la formación de columnas de suelo desecado relativamente rígido, las cuales están apoyadas sobre la arcilla blanda no desecada que se encuentra a mayor profundidad.

El mecanismo que produce el agrietamiento y sus consecuencias ha sido estudiado y documentado en detalle [Vesga, Caicedo, Mesa, 2002], [Vesga, Caicedo, Mesa, 2003]; se ha identificado que la desecación causa endurecimiento de las arcillas [Rodríguez, 2002], sin embargo este aumento de rigidez y de resistencia es muy variable y está acompañado por grietas que se extienden en profundidad hasta el nivel freático. Por efecto de las grietas se conforman columnas de suelo del orden de 5 a 7 m de altura y debido a que en profundidad la arcilla es más blanda, se produce la falla por corte en la base de estas columnas. Esto produce asentamientos locales y al fallar unas columnas se recuestan contra las aledañas produciendo un efecto dominó. El colapso del suelo puede ocurrir aún sin sobrecarga. El efecto de la sobrecarga y la posibilidad de sismo aumentan el potencial de inestabilidad del sistema. Los asentamientos pueden ser súbitos y de hasta 10 cm (en la Figura 1 se ilustra este proceso). El efecto del agrietamiento ha sido devastador para las estructuras y, particularmente, para las vías en la región. Por esta razón, se ha tratado de estudiar el fenómeno para buscar soluciones aplicables a las vías en concesión y a otras obras civiles.

En el presente artículo se analizan los datos de información del subsuelo del informe *Estudio de suelos subestación Bacatá* [Siemens, H-MV Ingenieros, 2005] que hizo parte de los estudios requeridos para el proyecto de diseño y construcción de la Subestación Bacatá en el marco de los proyectos UPME 01 de Interconexión Eléctrica S.A. Con

base en esta información se hicieron análisis de interacción suelo-estructura para diseñar alternativas de cimentación mediante mejoramiento del suelo con columnas de suelo estabilizado con una mezcla de cal y cemento.

Figura 1. Ilustración del proceso de deformaciones por agrietamiento.



Fuente: [Vesga, Caicedo, Mesa, 2002].

Se realizaron análisis con un modelo de elementos finitos, el cual permite modelar el comportamiento del suelo, el efecto de las grietas y de los elementos de refuerzo. Con base en estos modelos y con los criterios de control de asentamientos se puede entender el funcionamiento del sistema y definir la longitud, espaciamiento y resistencia requeridos para las columnas de suelo estabilizado.

2. ANÁLISIS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA PARA MEJORAMIENTO DE SUELOS

El problema que se quiere analizar es la interacción de inclusiones rígidas en un suelo fisurado, en el cual las fisuras están, en buena parte, abiertas. El análisis se concentra en analizar el estado actual del problema y su condición cuando se construyan elementos de refuerzo. No se pretende modelar el proceso, es decir, cómo ocurre el fisuramiento ni su desarrollo futuro, ya que éste es un problema complejo, por cuanto las fisuras son de hecho discontinuidades en el suelo, lo cual, por una parte, genera interacción entre los bloques y, por otra, concentraciones de esfuerzos y deformaciones en los sitios donde comienzan las grietas.

La interacción con elementos de refuerzo que se construyan en el terreno dependerá de su localización, de la manera como se construyan, lo cual define la forma como interactúan, y de las características de resistencia y deformabilidad de los elementos de refuerzo, con respecto a las propiedades del suelo. Desde este punto de vista se pueden clasificar las opciones de reforzamiento de acuerdo con los siguientes criterios [Xanthakos, Abramson, Bruce, 1994], [Davies, 1997]:

- Rigidez de las inclusiones: pueden ser rígidas, por ejemplo elementos de concreto prefabricados o contruidos en el sitio, inclusiones de madera o inclusiones metálicas. Estos elementos son mucho menos deformables que el suelo en el cual se instalan. También pueden ser inclusiones deformables, caso en el cual la deformabilidad de los elementos, aunque menor, es del mismo orden de magnitud que la del suelo circundante. En esta categoría se tienen elementos geosintéticos, utilizados normalmente para acelerar el drenaje y no como refuerzo, o inclusiones de otros tipos de suelos, usualmente columnas de grava o de arena.
- Método de construcción: pueden ser por desplazamiento, reemplazo o mezcla en sitio. Dentro de los métodos de desplazamiento se tienen particularmente los elementos hincados por presión, vibración o impacto. Dentro de los elementos hechos por reemplazo se tienen los elementos excavados y fundidos en el sitio, o algunas variedades de vibroflotación y dentro de los métodos de mezcla en sitio se tienen técnicas como el *jet grouting* y el *Colmix*® [Soletanche-Bachy, s.d.]. Algunas de las técnicas son procedimientos patentados.

La rigidez determina la posibilidad de interacción, ya que en estos problemas se deben dar condiciones de compatibilidad de desplazamientos en los elementos del sistema, lo cual afecta las distribuciones de esfuerzos y de deformaciones. El método de construcción define fundamentalmente la forma como se pueda dar la interacción entre los elementos del sistema, al afectar la capacidad de transferencia de carga y, en alguna medida, el estado de los materiales, de lo cual depende su resistencia y deformabilidad.

La modelación geotécnica se puede hacer con base en modelos empíricos basados en observación y precedente, modelos teóricos basados en soluciones analíticas, modelos numéricos o modelos físicos a escala completa o reducida, por ejemplo mediante simulación en centrífuga [Muir, 2004]. Para la modelación es necesario, en primera instancia, definir el problema, en lo que corresponde al dominio, condiciones de frontera e iniciales, ecuaciones diferenciales y los parámetros que en ellas intervengan.

Dada la complejidad del problema considerado y la falta de precedentes que permitan utilizar una solución empírica, se hace necesario utilizar una modelación numérica. El dominio se definió como una inclusión instalada en el suelo figurado en el cual las fisuras se modelan mediante el retiro en el modelo de los elementos que representan las fisuras abiertas y mediante interfaces (discontinuidades) para las grietas cerradas. Las condiciones de frontera se consideraron aleja-

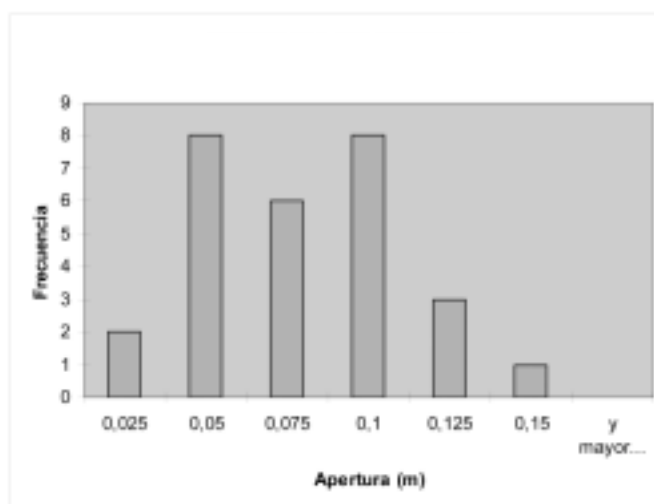
das una distancia correspondiente al área aferente de la columna, ya que al tratarse de un esquema de refuerzo homogéneo del suelo se dan condiciones de simetría en las fronteras de las áreas aferentes de las columnas adyacentes. Las condiciones iniciales (estado actual) y los parámetros de los suelos se obtuvieron de los ensayos de laboratorio y datos de exploración del terreno. El modelo constitutivo seccionado fue el de un material elastoplástico y el modelo físico el de las ecuaciones de equilibrio y elasto-plasticidad. Para la solución del modelo se utilizó la técnica de los elementos finitos, como se describe en detalle más adelante.

3. CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO

La caracterización del subsuelo se hizo con base en los resultados de la exploración del subsuelo, que se hizo en el estudio de la estación y de datos disponibles de otros proyectos y estudios realizados sobre los suelos de la Sabana [H-MV Ingenieros, 2003], [Consulobras-Jeoprobe, 2005], [Rodríguez, 2002].

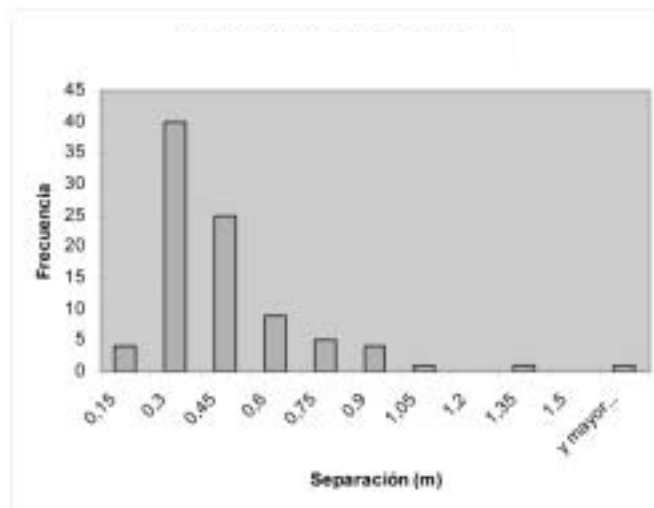
Los aspectos más relevantes del comportamiento de los suelos están relacionados con la cantidad, la profundidad y con la apertura de grietas, la rigidez y la resistencia de los suelos y su potencial de cambios volumétricos por desecación. En el estudio de suelos, para la estación, se realizaron catorce apiques, en los cuales se hizo un inventario de grietas. La información de noventa datos de grietas identificadas, de las cuales veintiocho reportan apertura, se resume en las Figuras 2 y 3, en forma de histogramas de separación y apertura de grietas.

Figura 2. Histograma de apertura de grietas



Fuente: presentación propia del autor.

Figura 3. Histograma de separación de grietas

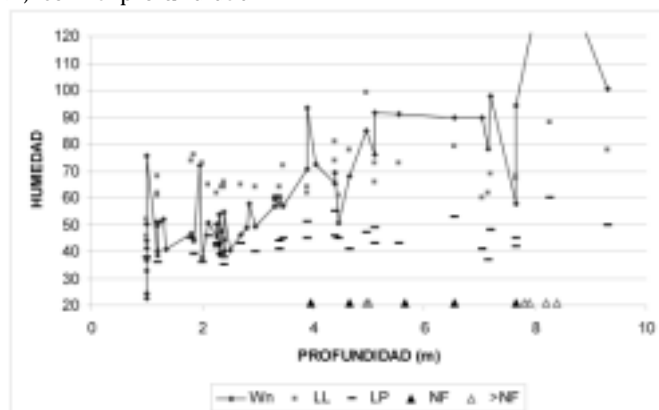


Fuente: presentación propia del autor.

Los resultados resaltan la gravedad del problema del agrietamiento, ya que en todos los apiques se encontraron grietas con una separación preferencial del orden de 0,3 m; aproximadamente el 30% de ellas con apertura entre 5 y 10 cm.

En el estudio de suelos no se reporta con claridad la extensión y la profundidad de las grietas, pero, a partir de los estudios detallados de Vesga, Caicedo y Mesa [2003], se sabe que éstas se extienden hasta la profundidad del nivel freático en la medida en que el suelo pierde humedad y se contrae. Para evaluar esta situación, en la Figura 4 se presenta la información del estudio de suelos de variación de humedad, límites de consistencia y nivel freático con la profundidad.

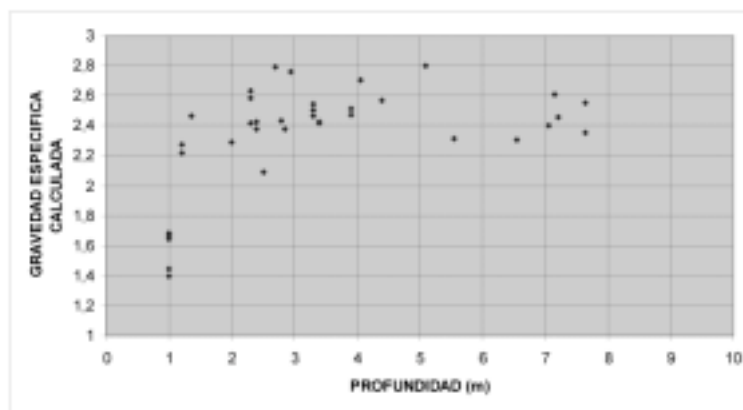
Figura 4. Variación de la humedad (Wn), límites de consistencia (LL, LP) y nivel freático (NF) con la profundidad



Fuente: presentación propia del autor.

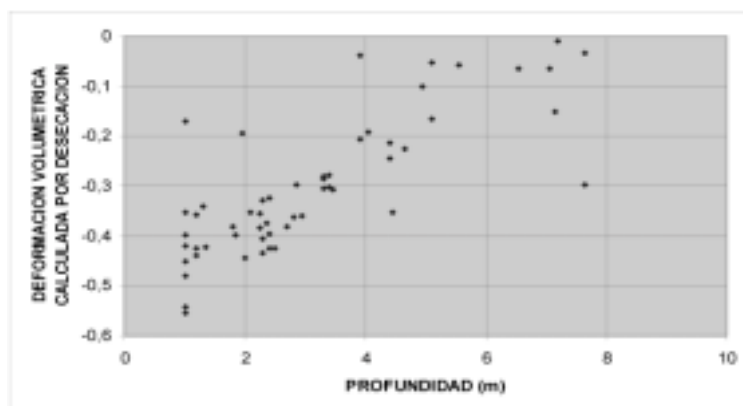
Los resultados de la Figura 4 muestran que la humedad natural aumenta linealmente con la profundidad, desde valores del orden de cuarenta (muy similar al límite plástico) hasta valores del orden de noventa (muy similares al límite líquido) entre 1 y 5 m de profundidad. La arcilla tiene valores de límites de consistencia muy similares en profundidad, lo cual es indicativo de que se trata del mismo material de origen lacustre. La variación de la humedad con la profundidad se debe a la desecación. A partir de los datos de humedad y del peso unitario, medidos en el estudio, se puede calcular la gravedad específica de los suelos (Figura 5) y asumiendo que, inicialmente, se tenían las mismas condiciones de suelos en profundidad, se puede calcular la deformación volumétrica debida a la pérdida de humedad. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 6.

Figura 5. Gravedad específica calculada a partir de los datos medidos de humedad y peso unitario



Fuente: presentación propia del autor.

Figura 6. Deformaciones volumétricas en profundidad por desecación del suelo que han ocurrido desde su formación

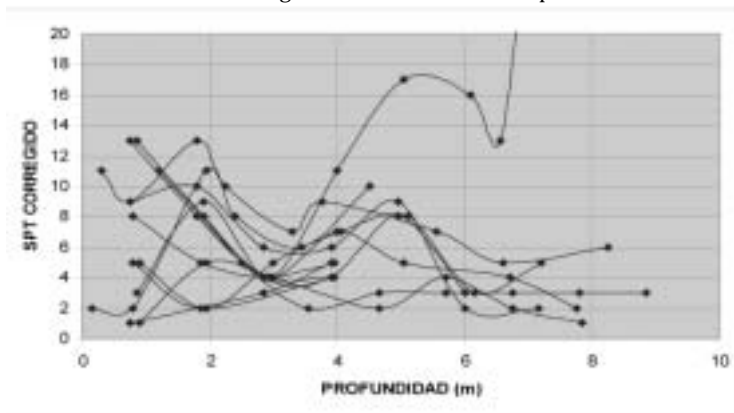


Fuente: presentación propia del autor.

Los datos de la Figura 6 muestran que las deformaciones volumétricas han sido muy grandes (50% desde la formación de estos suelos), variando linealmente con la profundidad en proporción al cambio de humedad. Obviamente, estas deformaciones han ocurrido en un tiempo largo, pero en los últimos años se han incrementado. Estas deformaciones se traducen en asentamientos generales del terreno (deformación vertical), pero debido a que su magnitud es tan alta, el suelo también se debe contraer lateralmente dando lugar a las grietas; esta situación explica por qué las grietas son tan frecuentes y con aperturas tan grandes.

En adición a los apiques, para el estudio se hicieron trece perforaciones, en las cuales se obtuvieron muestras y en las cuales también se midió la resistencia de los suelos en el ensayo de penetración estándar. Los resultados reportados en el estudio de los valores de SPT, corregidos por efectos de la presión de confinamiento y de otros efectos del ensayo, se presentan en la Figura 7. Estos resultados indican que, en general, la resistencia de las arcillas del área disminuye en profundidad de valores de SPT de 10 cerca de la superficie a valores de 2 hacia los 5 m y, a partir de esta profundidad, se mantienen dentro del rango de 2 a 5 m. Sin embargo, en los primeros 5 m hay una amplia variación y los valores de SPT que se encuentran están entre los valores del suelo blando y los del suelo desecado. Esto es similar a lo reportado por Rodríguez [Rodríguez, Parámetros, 2002], en el sentido en que la resistencia medida, en estos suelos residuales, varía puntualmente entre los valores del suelo reblandecido y los del suelo desecado, y esta variación puede ser, incluso, de un orden de magnitud.

Figura 7. Valores de SPT corregidos obtenidos en las perforaciones



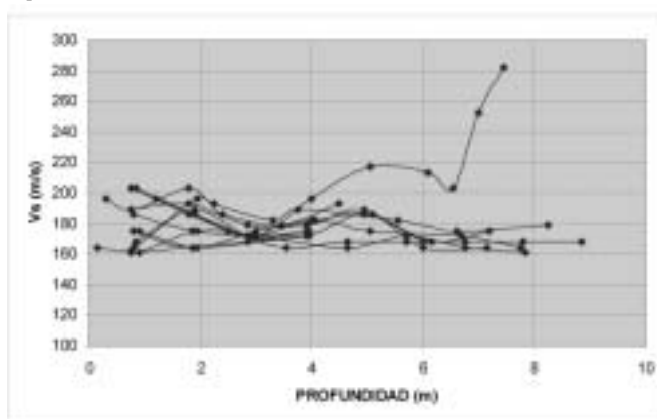
Fuente: presentación propia del autor.

Como se aprecia en la Figura 7, la resistencia varía bastante puntualmente. Sin embargo, es evidente que, en su conjunto, el material se hace más rígido hacia la superficie y menos en profundidad. Esto es importante para el planteamiento de los análisis de interacción suelo-estructura, que se discuten más adelante.

Con el fin de evaluar módulos de deformabilidad de los suelos para los análisis de interacción suelo-estructura se utilizó el procedimiento propuesto en [Rodríguez, Velandia, Reyes, 2004], el cual ha demostrado que permite predecir deformaciones de problemas complejos de cimentaciones en los suelos blandos de la ciudad de Bogotá [Rodríguez, 2005]. Este método parte de la medición del módulo de deformación de los suelos en el terreno a muy bajas deformaciones por medio de ensayos geofísicos o correlación con otros ensayos. Estos valores se ajustan, posteriormente, para tener en cuenta la variación del módulo de rigidez con la deformación y con la presión de confinamiento [Duncan, Chang, 1970], bien sea utilizando un modelo que permita representar, de manera detallada esta variación [Schanz, Vermeer, Bonnier, 1999] o utilizando un valor de módulo elástico equivalente representativo, que fue la consideración que se hizo en el presente caso.

Para aplicar este método se partió de valores de velocidad de onda de corte (V_s) calculadas por correlación con valores de SPT. La correlación se obtuvo a partir de datos de estudios de respuesta dinámica realizados en Bogotá [Consulobras-Jeoprobe, 2005], [Geoingeniería, 2001], [Geoingeniería, 2002], [Geoingeniería, 2004], [Rodríguez, 2004], [H-MV Ingenieros, 2003], los cuales son recopilados por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito (DPAE); dichas correlaciones son consistentes con otras reportadas en la literatura [Nath et al, 1997]. A partir de estas correlaciones se obtuvieron los estimativos de valores de V_s , los cuales tienen como base los ensayos de SPT y su variación con la profundidad que se presentan en la Figura 8. Estos valores están en buena coincidencia con valores medidos en el sitio mediante ensayo de Down Hole y refracción sísmica en el estudio de H-MV [H-MV Ingenieros, 2003], en el cual se registró una velocidad de 180 m/s, para los primeros metros, disminuyendo en profundidad hasta valores del orden de 100 m/s.

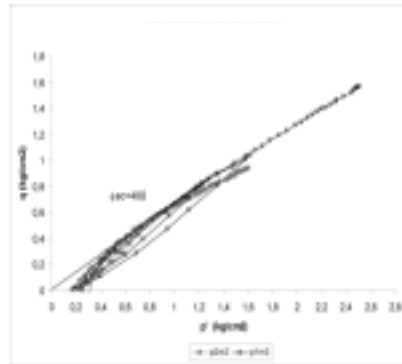
Figura 8. Variación de la velocidad de onda de corte (V_s) con la profundidad estimada a partir de los valores de SPT.



Fuente: presentación propia del autor.

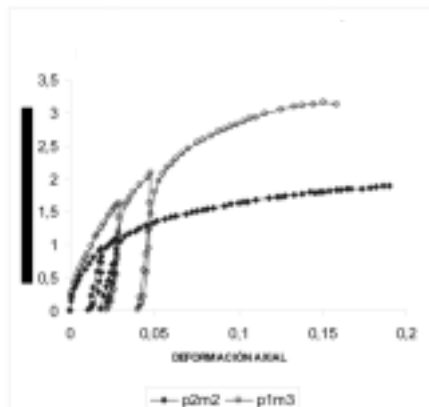
A partir de los valores de V_{sm} por su relación con el módulo de corte G y la densidad, $V_s^2 = G/\rho$, se pueden estimar valores de G y con la relación de Poisson los del módulo de elasticidad, E . Los suelos se comportan elásticamente para muy bajas deformaciones, como es el caso de la propagación de ondas, por lo cual es posible estimar la relación de Poisson. La densidad, se tiene a partir de los datos de peso unitario reportados en el estudio; asimismo, se debe tener en cuenta que la rigidez de los suelos varía mucho con el nivel de deformaciones del problema. Por lo tanto, es necesario estimar la reducción de la rigidez para utilizar los valores de E en los modelos. Esto se puede hacer a partir del análisis de ensayos triaxiales, en los cuales se mida la relación esfuerzo-deformación para varios niveles de esfuerzos. En el estudio de Consulobras-Jeoprobe [2005] se hicieron ensayos triaxiales cíclicos de esfuerzo controlado y se recopilaron ensayos triaxiales estáticos sobre suelos del mismo origen y características mecánicas de los de la estación.

Figura 9. Trayectorias de esfuerzo en ensayos triaxiales CU de arcillas o limos superficiales de la Sabana.*



* 1,5-2,2m, arcilla café con arena fina
Fuente: presentación propia del autor.

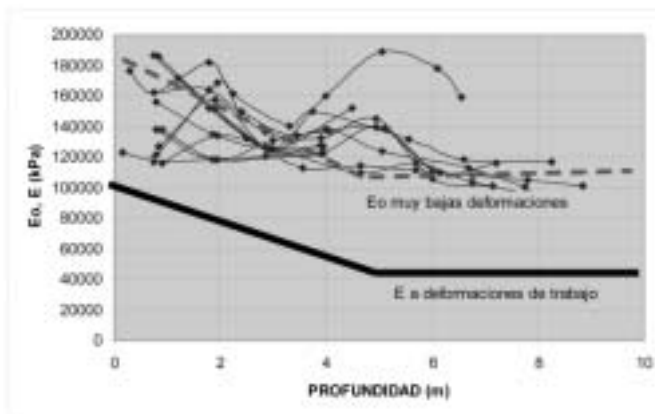
Figura 10. Curvas esfuerzo-deformación de arcillas o limos superficiales de la Sabana*



* p1-m3, 1,5-2,2m, Limo café con arena fina
Fuente: presentación propia del autor.

Los resultados de estos ensayos, complementados con las observaciones de Rodríguez, Velandia y Reyes [2004] y Rodríguez [2005], permitieron estimar unos valores de módulo de elasticidad para los análisis de interacción suelo-estructura, a partir de los datos de la Figura 8. El perfil adoptado para los análisis se presenta en la Figura 11. En la figura se aprecia el valor adoptado para las condiciones a bajas deformaciones, a partir de las correlaciones con los valores de SPT. Como ya se indicó, en estos valores hay dispersión, especialmente en los primeros 5 m, ya que localmente se tienen suelos reblandecidos o se obtienen datos de menor resistencia cerca de las grietas. Sin embargo, dado que se está considerando el problema de un volumen grande de suelo, en el cual las grietas se modelan de forma explícita, se debe considerar la rigidez del suelo desecado, para el cual corresponden los valores en el rango alto. Se adoptó un valor medio de los valores en el rango superior y se observa que los valores de módulo de elasticidad pueden tener variaciones puntuales del orden de 20.000 kPa (15% del promedio). Sin embargo, estas variaciones posiblemente se compensen de punto a punto dentro de la masa de suelo. Estas variaciones pueden representar incertidumbres en los resultados del orden del 10%, aproximadamente, los cuales son normales en todos los procesos que involucran materiales térreos.

Figura 11. Perfil de módulos de elasticidad utilizados en el modelo.



Fuente: presentación propia del autor.

Con base en la información disponible también se estimaron parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos para los suelos como se presenta en resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros utilizados para los modelos.

No.	Identificación	Peso Unitario	Rel. De Poisson	Módulo de elasticidad E	Cohesión	Angulo de fricción interna	Cambio de E con la profundidad
		[kN/m ³]	[-]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[°]	[kN/m ³]
1	arcilla fisurada	16	0,3	100.000	50	20	-12.000
2	arcilla no fisurada	15	0,3	40.000	20	25	0
3	suelo estabilizado	18	0,3	500.000	2.000	30	0

Fuente: presentación propia del autor.

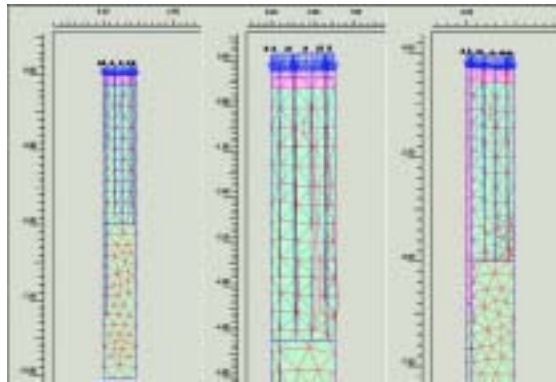
4. MODELACIÓN DEL PROBLEMA

Para representar el problema y para poder definir los requisitos de las columnas de suelo-cemento-cal, se hizo un modelo en el cual se analizó el efecto de una columna con un área aferente alrededor, incluyendo el efecto de las grietas. En la superficie existe una placa de concreto que se apoya tanto en el suelo como sobre las columnas y sobre la cual se aplicó una sobre carga uniforme sobre el área aferente hasta la falla del sistema suelo-estructura. Estas columnas se consideraron de varias longitudes, con el fin de evaluar el efecto de la longitud sobre su funcionamiento.

Para los análisis se utilizó el programa PLAXIS Profesional (V.7.2) [PLAXIS, 1998], con un modelo axisimétrico. Los suelos se modelaron como elastoplásticos. Las arcillas superficiales tienen una variación lineal de rigidez, como se muestra en la Figura 11, de 5 m para abajo tienen características homogéneas. Los análisis se hicieron en términos de esfuerzos efectivos en condición drenada, para las cargas permanentes y en condición no drenada para las cargas a corto plazo (caso de sismo). Las columnas de suelo-cemento-cal y la placa de cimentación se modelaron como material elastoplástico con un alto módulo de elasticidad. En el modelo se incluyeron grietas cada 30 cm, las cuales estaban cerradas y cada dos de ellas se incluyó una cuña de 5 cm de base en la parte alta que se cierra en la base, al encontrar el nivel del freático (5 m); estas cuñas se retiran del modelo al representar la construcción de las columnas antes de comenzar a aplicar las cargas. Las grietas cerradas, se modelan mediante interfaces, en las cuales se considera una reducción de resistencia del 70%. Se consideraron varios espaciamientos entre columnas, los cuales se representan variando la extensión lateral del modelo.

A continuación se ilustra el modelo utilizado y los resultados obtenidos al aplicar la carga hasta la falla. Los resultados se evalúan en términos de curvas cargas-asentamiento, con base en las cuales se pueden obtener módulos de reacción para análisis estructurales.

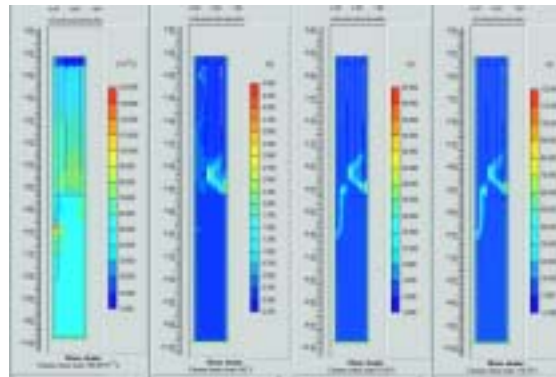
Figura 12. Modelo de análisis utilizado.*



* A la izquierda se ilustra la malla de elementos finitos y la asignación inicial de materiales. En la parte central se ilustra el patrón de deformaciones si se aplica la carga directamente sobre el suelo sin refuerzo y a la derecha el modelo con la columna de suelo estabilizado.

Fuente: presentación propia del autor.

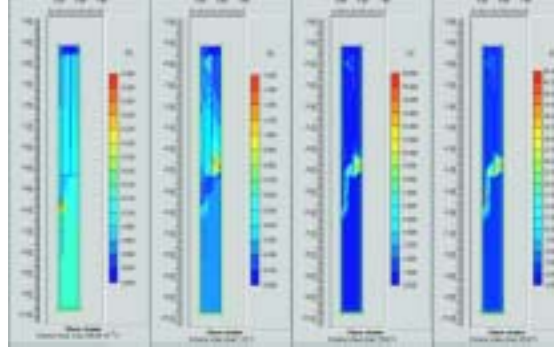
Figura 13. Deformaciones por corte para niveles de carga de cincuenta, cien, ciento cincuenta y ciento ochenta y siete (falla) con refuerzo de columnas separadas a 2,4 m y de 6 m de longitud.*



*Los valores máximos de deformación por corte de izquierda a derecha alcanzan 0,13%, 4,4%, 51,4% y 114 %. Los valores máximos ocurren en la base de las grietas.

Fuente: presentación propia del autor.

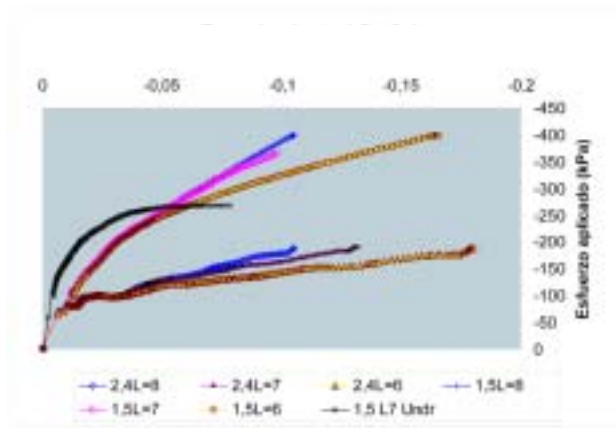
Figura 14. Deformaciones por corte para niveles de carga de cien, doscientos, trescientos y cuatrocientos (falla) con refuerzo de columnas cada 1,5 m y de 6 m de longitud.*



*Los valores máximos de deformación por corte de izquierda a derecha alcanzan 0,29%, 1,4%, 15,8% y 45 %. Los valores máximos ocurren en la base de las grietas y a lo largo del contacto suelo estabilizado - arcilla blanda.

Fuente: presentación propia del autor.

Figura 15. Efecto del refuerzo con columnas de suelo-cemento-cal en función de su longitud (L) y el espaciamiento sobre las cargas admisibles y los asentamientos para condición drenada (cargas permanentes a largo plazo, y no drenada -Undr- para las columnas de 1,5m de separación y 7 m de longitud).



Fuente: presentación propia del autor.

Los resultados de las figuras 13 y 14 muestran patrones de concentración de deformaciones (superficies de falla) similares a las encontradas por Vesga, Caicedo y Mesa [2002] en el terreno. Esto se aprecia en los patrones de corte en forma diagonal hacia la base de las columnas, donde se forman zonas de falla en la misma forma que se ilustra en la Figura 1, a partir de lo observado en el terreno. El efecto de las fisuras produce fallas por corte en la base de las columnas de suelo, las cuales se traducen en grandes asentamientos en la superficie.

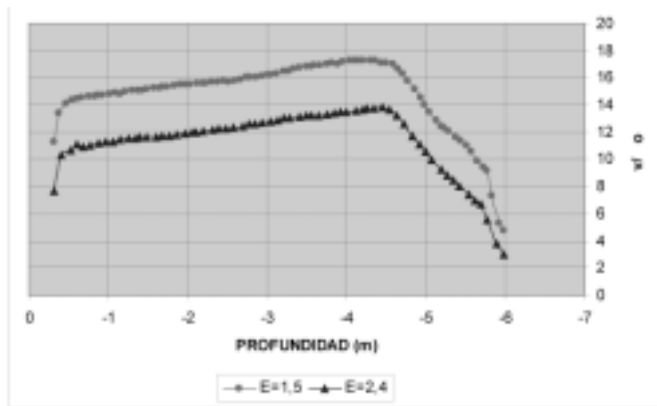
Los resultados de la Figura 15 muestran el efecto del espaciamiento de las columnas: entre más cerca se encuentren, mucho más efectivo es controlar la producción de las deformaciones y el aumento de la capacidad portante. Sin embargo, para el rango de las condiciones consideradas la pendiente de la curva esfuerzo-deformación es similar, lo cual indica que las columnas de refuerzo del suelo no tienen efecto en reducir las deformaciones del suelo, sino que previenen que haya colapso de las columnas de suelo. Se aprecia que la profundidad de las columnas tiene un efecto secundario; su efecto aumenta la capacidad ligeramente, pero sólo cuando ya se han producido asentamientos importantes. En el caso de la separación de 2,4 m se aprecia que el comportamiento es similar para los tres casos considerados, en el sentido en que para cargas del orden de 75 kPa se presenta una falla o fluencia del sistema, lo cual indica su máxima capacidad admisible para deformaciones del orden de 2 cm. Los análisis mostraron que para mayores espaciamientos el efecto del refuerzo es prácticamente nulo.

El efecto de aumento de la capacidad portante del sistema con columnas espaciadas a 1,5 m es bastante notable, con respecto al espaciamiento de 2,4 m. Se aprecia que, en este caso, el comportamiento del sistema es más dúctil, en comparación con el caso de la separación de 2,4 m, y se pueden alcanzar valores de carga de trabajo del orden de 200 kPa para deformaciones del orden de 2 cm. Se aprecia una diferencia importante entre el comportamiento de las columnas de refuerzo de 6 y las de 7 m, pero prácticamente ninguna diferencia entre las de 7 y 8 m.

En la Figura 15 se indican también, los resultados del análisis realizado para condiciones no drenadas con columnas espaciadas 1,5 m. En este caso, debido a la baja compresibilidad del suelo sin drenaje, el módulo de rigidez que se observa es más alto y la resistencia es menor que en condiciones drenadas. Estos resultados muestran que la carga máxima antes de que comience el comportamiento no lineal del sistema sería de 150 kPa y que el coeficiente de reacción de la subrasante equivalente del sistema es de 21.000 kN/m^3 . Este valor es del orden de tres veces el correspondiente al caso drenado que corresponde a una situación de carga a largo plazo con cargas permanentes, el cual es de 8.000 kN/m^3 .

Por otra parte, se evaluaron los esfuerzos a compresión en el material de refuerzo de suelo-cemento-cal, para poder definir las especificaciones de resistencia. En este caso se produce una transferencia de carga por fricción del suelo adyacente a las columnas de suelo, lo cual tiene un efecto estabilizador como parte de la redistribución de cargas que requiere el equilibrio y la compatibilidad de deformaciones que impone el sistema de suelo reforzado. En la Figura 16 se aprecia la distribución de esfuerzos de compresión a lo largo de las columnas de suelo estabilizado para separación de 1,5 y 2,4 m entre columnas normalizadas, con respecto a la carga aplicada en la superficie.

Figura 16. Distribución de esfuerzos de compresión a lo largo de las columnas de suelo estabilizado para separación de $E=1,5$ m y $E=2,4$ m entre columnas, condición drenada (cargas permanentes a largo plazo).



Fuente: presentación propia del autor.

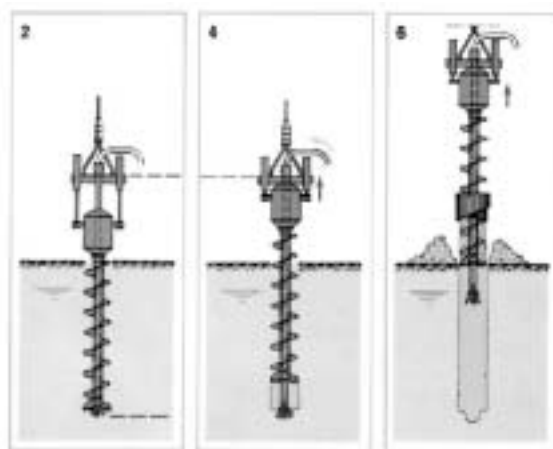
Los resultados de la Figura 16 muestran que la carga aplicada sobre el área aferente de una columna se concentra en la columna y varía a lo largo de la misma. Se aprecia que hay una transferencia de carga a lo largo de la columna en adición de la carga que se transmite directamente a la cabeza de la columna por la placa de cimentación.

Con base en los resultados de estos análisis es posible definir la resistencia de trabajo que deben tener las columnas de suelo reforzado. Para presiones de contacto del orden de 100 kPa, y separación entre columnas del orden de 1,5 m, se requiere que la resistencia a la compresión del material estabilizado sea de, por lo menos, 1.500 kPa. Este rango de resistencia está en el rango inferior del que usualmente se utiliza para sub-bases estabilizadas con cemento. De acuerdo con las recomendaciones de la USACE EM 1110-3-137 [1984] para estabilización de suelos, se deduce que se requiere dosificar del orden de 4% de cal y 8 a 12% de cemento a los suelos arcillosos del sitio que tienen índices de plasticidad, antes del tratamiento del orden de veinte a treinta y peso unitario entre 15 m y 18 kN/m³.

5. SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE REFUERZO

El sistema de construcción que se puede utilizar para las columnas de suelo estabilizado con cal y cemento se ilustra en la Figura 17.

Figura 17 Esquema constructivo para las columnas de suelo estabilizado con cal y cemento.



Fuente: presentación propia del autor.

El esquema consiste en utilizar una perforadora que pueda bajar con aspas o hélices rotativas, las cuales desagregan el suelo hasta la profundidad especificada y, posteriormente, se devuelvan mezclando el suelo de manera uniforme con una lechada de cal y cemento. Estas columnas de suelo estabilizado actúan como elementos de refuerzo y homogenización para transmitir las cargas a través de la capa de suelo fisurado. Existen otras alternativas de construcción con base en desplazamiento. Una puede ser mediante la hinca de una camisa metálica con una punta perdida que desplaza el terreno y permite posteriormente vaciar, en su interior, una mezcla de concreto, grava, arena o suelo estabilizado que conforma la inclusión. A medida que se va rellenando el hueco se va retirando la camisa que es reutilizable.

6. CONCLUSIONES

Se presentan los resultados de análisis del comportamiento de los suelos fisurados que se encuentran en una buena parte del Occidente de la Sabana de Bogotá, los cuales han producido graves daños a la infraestructura de la región. Estos análisis permiten entender y cuantificar el comportamiento de estos suelos utilizando los datos de un proyecto real. Los resultados de los análisis son consistentes con las observaciones de campo realizadas en estudios previos.

Los análisis de interacción suelo-estructura realizados permiten diseñar un sistema de refuerzo para suelos fisurados mediante inclusiones rígidas. El método permite determinar el espaciamiento, la longitud y la resistencia óptimos, para las inclusiones de una manera racional. Los resultados de los análisis permiten entender el funcionamiento del sistema y su efecto sobre el comportamiento de los suelos, a partir de lo cual se pueden tomar decisiones de ingeniería para diseño y para construcción. Es importante hacer un monitoreo del com-

portamiento de este tipo de soluciones que se están comenzando a utilizar en varios proyectos en el área, con el fin de validar los resultados de los modelos y de los análisis realizados. Los datos de este tipo de monitoreo aún no están disponibles, pero se espera poder contar con ellos en un futuro y poder complementar los resultados de esta investigación en aspectos de interacción suelo-estructura de inclusiones en suelos deformables.

7. AGRADECIMIENTOS

El autor quiere expresar su agradecimiento a SIEMENS, ISA y HMV Ingenieros Ltda. (antes Mejía Villegas S.A.), quienes han permitido desarrollar la investigación y publicar los datos que se presentan en este artículo.

REFERENCIAS

- Consulobras-Jeoprobe Ltda. *Informe geotécnico pondaje auxiliar Fontanar del Río*. s.d.: Acueducto de Bogotá, 2005.
- Davies, M.C. (editor). *Ground Improvement Geosystems: Densifications and Reinforcement*. s.d.: American Society of Civil Engineers, 1997.
- Duncan, J.M., Chang, C.Y., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil. En: *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96, 1970, 1629-1653.
- GeoIngeniería Ltda. *Asesoría geotécnica y sísmológica para la evaluación y reforzamiento sísmico del edificio sede de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá*. s. d.: EAAB, 2001 .
- _____. *Asesoría geotécnica y sísmológica para la evaluación de la amenaza sísmica proyecto La Calleja, transversal 32 y 33 con calle 131 y 132*. s.d.: s.d., 2002.
- _____. *Asesoría geotécnica y sísmológica para la evaluación de la amenaza sísmica del edificio Avenida 100 No 19-64*. s.d.: s.d., 2004.
- H-MV Ingenieros Ltda. *Estudio de actualización del Plan Maestro de alcantarillado de la cuenca del Salitre*. Informe técnico. Producto 6 -Tecn-969001-Ar- Versión 01 -Análisis de riesgo sísmico red troncal de alcantarillado de la cuenca del Salitre, 2003.
- _____. *Estudio de actualización del Plan Maestro de alcantarillado de la cuenca del Salitre*. Informe técnico. Análisis de riesgo sísmico red troncal de alcantarillado de la cuenca del Salitre, 2003.
- _____. *Estudio de actualización del Plan Maestro de alcantarillado de la cuenca del Salitre*. Informe Técnico. Diseño obras de adecuación hidráulica Río Bogotá, Sector La Conejera -Alicachín, 2003.
- Ingeoriesgos Ltda. *Estudios de suelos para los puentes sobre la Autopista Norte, calle 100 y calle 170*. s.d.: s.d., 2002.

- Muir Wood, D. *Geotechnical Modelling*. London: Spon Press-Taylor and Francis, 2004.
- Nath, S. K. et al. "Correlation Study of Shear Wave Velocity in Near Surface Geological Formations in Anchorage". Alaska. En: *Earthquake Spectra*, 13 (1), 1997, 55-75.
- PLAXIS. PLAXIS Professional V7.2. *Finite Element Code for Soil and Rock Analysis*. Rotterdam: Balkema, 1998.
- Rodríguez, J. *Parámetros Geomecánicos de las arcillas superficiales de la Sabana de Bogotá*. IX Congreso colombiano de Geotecnia, Medellín, 2002.
- _____. *Estudio geotécnico Pondaje CAFAM, para Unión temporal Himexa-Diego Jaramillo – Acueducto de Bogotá*, 2002.
- _____. *Asesoría geotécnica y sísmológica para el estudio de respuesta de amplificación local Altos de Normandía*. s.d.: s.d., 2004.
- _____. "Case Study of a Deep Excavation in Soft Soils and Complex Ground Water Conditions in Bogotá". *Fifth International Symposium Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground –TC28–* Amsterdam, 2005.
- Rodríguez, J. Velandia, E., Reyes, F. *Caracterización de suelos blandos para modelos de plasticidad*. X Congreso colombiano de Geotecnia, Paipa, 2004.
- Scahnz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. "Formulation and Verification of the Hardening Soil Model". *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. R.B.J Brinkgreve, Rotterdam: Balkema, 1999.
- SIEMENS-H-MV Ingenieros Ltda. *Estudio de suelos subestación Bacatá*. Documento 2330IS016P2848861254(1), realizado por Solingral SA para H-MV Ingenieros Ltda (antes Mejía Villegas S.A.), 2005.
- Soletanche-Bachy. *Colmix,® método para mejoramiento del suelo con base en mezcla en sitio*. s.d.: s.d., s.d.
- US Army Corps of Engineers. *Soil Stabilization for Pavements Mobilization. Construction Engineering and Design Manual*. s.d.: EM, 1984.
- Vesga, L., Caicedo, B., Mesa, L. *Comportamiento del subsuelo arcilloso de La Sabana de Bogota debido a su agrietamiento profundo causado por desecación*. IX Congreso colombiano de Geotecnia, Medellín, 2002.
- _____. *Deep Cracking in Sabana de Bogotá Clay*. XII Pan American Congress on Soil Mechanics, Soil and Rock America, Cambridge, 2003.
- Xanthakos, P., Abramson, L., Bruce, D. *Ground Control and Improvement*. New York: John Wiley & Sons, 1994.