

Inyecciones de consolidación con cemento en suelos finos

Consolidation Injection with cement in fine soils

Carlos Andrés Ramírez Niño*
Néstor Andrés Pesca Gamba**
Óscar Ramírez***

Resumen

El proceso de mejoramiento del suelo con esta técnica se desarrolló mediante la escogencia de un sitio en donde se presentan suelos finos, para proceder a realizar una exploración geotécnica y hacer una caracterización, determinando las propiedades físicas y mecánicas del suelo de estudio. Con los resultados obtenidos, el siguiente paso corresponde a la adaptación del equipo de inyección para empezar las inyecciones de consolidación. Las inyecciones se realizaron en los mismos taladros de la exploración con una lechada de agua-cemento, determinando un rango de presiones. Después de realizadas las inyecciones se hizo una nueva exploración para determinar, mediante comparación de los parámetros, el cambio en las propiedades físicas y mecánicas del suelo y así observar la utilidad del proceso de mejoramiento.

Palabras clave: Cemento, Inyecciones de consolidación, Mejoramiento del suelo, Suelos finos.

Abstract

In the process of improvement of the soil stability by means of this technique, a place was chosen where fine soil is present, to make an geotechnical exploration in order to make a characterization which determines the soil studied's physical and mechanical properties. Having the results the following step was adapting the equipment to begin the consolidation injections. The injections were carried out in the same exploration holes drilled with a water cement grout, determining a range of pressures. After having carried out the injections a new exploration was made, to determine by means of the parameters comparison, the soil changes in the physical and mechanical properties and by this way to observe the utility of the improvement process.

Key words: Cement, Consolidation injections, Soil improvements, Fine soils.

* Ingeniero Civil UPTC, Integrante Grupo Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales "GIISAG". Correo e.: ingcarlosramirez@gmail.com

** Ingeniero Civil UPTC, Joven Investigador Grupo Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales "GIISAG" Correo e.: pescaing@gmail.com

*** Ingeniero Civil, Magíster Geotecnia Universidad Nacional de Colombia, Docente Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Director Grupo Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales "GIISAG". Correo e.: oscarlramirez@yahoo.es

1. Introducción

La inyección de suelos es un tema que se ha estudiado en varios aspectos y, principalmente, en rocas fisuradas, aluviones y suelos granulares en general. Al hacer una revisión de la documentación existente sobre este tema, se puede observar que se explican aspectos generales de cómo inyectar, bajo qué parámetros y cómo se mueve la inyección en el medio; es decir, se explica cómo y por qué se mejora un suelo a partir de la inyección de un mortero, pero no se dice cuánto; además, se habla muy poco sobre el accionar de estas en suelos finos, hacia los cuales se dirige el presente trabajo [1].

Las inyecciones de consolidación, en específico, están enfocadas a mejorar la capacidad portante de los suelos y su deformabilidad; este estudio pretende conocer el comportamiento de los parámetros físicos y geomecánicos más importantes del suelo antes y después de someterlo a un proceso de mejoramiento con inyecciones de lechada agua-cemento a diferentes presiones.

Para esto se realizaron seis perforaciones en un suelo fino de la parte baja de la ciudad de Tunja, a una profundidad de cuatro metros, con el fin de obtener muestras representativas para realizar ensayos de laboratorio y obtener los parámetros del suelo. Se realizó la inyección de este suelo seleccionado con una lechada de agua-cemento a través de un equipo adaptado con productos muy comerciales y posteriormente se realizaron doce sondeos alrededor del sitio inyectado para conocer el nuevo estado del suelo.

Esta investigación establece una comparación de los parámetros geotécnicos a partir de los ensayos realizados y pretende abrir un camino hacia la investigación de este tema, que puede ser tratado desde varios puntos de vista, como lo pueden ser otros materiales de inyección y otros tipos de suelos finos que no alcanza a abarcar el presente estudio.

Finalmente, se busca invitar a los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Civil para que desarrollen trabajos de grado que involucren el uso de técnicas

de construcción que aporten a la región nuevos métodos constructivos y la posibilidad de implementarlos.

2. Marco teórico

2.1 Inyecciones. En ocasiones, los suelos en su estado natural no presentan las condiciones ideales para desarrollar una estructura; esto reclama un conocimiento para poder usarlos y, muchas veces, la necesidad de mejorarlos. Los suelos granulares pueden licuarse durante un sismo, causando asentamientos; el resultado puede ser daños a edificios, puertos, puentes, presas, etc. Las arcillas blandas no presentan suficiente capacidad de carga para una nueva construcción. Las arcillas expansivas causan daño a carreteras y vías ferroviarias. Aun la roca más firme no es tan sólida como parece. La caliza presenta fisuras y cavidades debido al flujo subterráneo, causando asentamientos en la superficie [2].

Hoy la ingeniería geotécnica ofrece distintas alternativas para consolidar los suelos y mejorar sus características mecánicas, entre las cuales se puede destacar:

- Drenajes, congelación
- Consolidación electroquímica
- Vibroflotación, columnas de basalto
- Compactación dinámica o mediante explosivos
- Compactación por inyección sólida
- Columnas de Colmix, (minipilotes de suelo cemento)
- Jet-Grouting (cementación mediante chorros de lechada a muy elevadas presiones)
- Inyecciones de consolidación

Esta amplia gama permite solucionar la gran mayoría de los problemas ligados a la realización de obras en suelos de mala calidad, que sean rellenos artificiales, gravas, arenas, arcillas, con o sin nivel freático.

La elección de la técnica depende de factores tan variados como el tipo de suelo, el volumen de suelo por consolidar, el carácter temporal o permanente de la consolidación, la resistencia final deseada para el material consolidado o el entorno de la obra.

2.2 Inyecciones de consolidación. Son las que se realizan con el objetivo de mejorar las características portantes del terreno y reducir su deformabilidad, lo cual se logra con la incorporación a presión en el suelo de lechadas de productos cementantes que al fraguar en el suelo lo consolidan [3].

2.2.1 Inyecciones de consolidación en rocas fisuradas y kársticas. La consolidación de una roca puede ser necesaria para permitir la ejecución de perforaciones; la perforación de una galería en terreno difícil, para mejorar la capacidad resistente de la cimentación de una obra, o la inyección de una roca de mala calidad bajo la pila de un puente.

A veces es necesario consolidar un suelo para evitar que sea un punto débil en una pantalla de estanca. Por ejemplo, las arcillas blandas que rellenan cavernas pueden ser comprimidas por inyección para evitar su desaparición bajo la presión del agua, llegando a ese resultado por agrietamientos sistemáticos debido a la ininyectabilidad de las arcillas. Las rocas que pueden ser consolidadas comprenden fisuras o cavidades bastante abiertas o se presentan bajo la forma de bloques sueltos [2].

2.2.2 Consolidación de aluviones. Los aluviones de arenas y gravas, e incluso solo arenosos, constituyen generalmente un terreno excelente de cimentación. Por eso no es frecuente que haya que consolidarlos para aumentar su capacidad resistente. Sin embargo, ofrecemos dos ejemplos de tales trabajos. Uno concierne a los *loess* cuya estructura, de constitución suelta, permite asientos importantes, y el otro se refiere a un compresor de aire cuya amplitud de vibraciones se redujo por inyección. Como puede verse, se trata de casos muy particulares [2].

2.2.3 Consolidación de depósitos de suelos finos. Debido a la naturaleza del suelo, las inyecciones de consolidación son hechas a partir de productos químicos cuya viscosidad es muy baja, lo cual ayuda a la incorporación de este material con el suelo por mejorar. Para llevar a cabo el proceso de inyección en un suelo fino es necesario contar con los equipos para la realización del proceso de mejoramiento; estos equipos no se diferencian mucho de los utilizados en otro tipo de inyecciones [2].

Las presiones de inyección tienden a ser altas para permitir una entrada de la lechada en el suelo; presentan inconvenientes si no son controladas, dado que pueden llegar a fracturar el suelo, dando como resultado un alto consumo de la lechada y un desmejoramiento de las características del suelo.

Las inyecciones de consolidación con cemento en suelos finos no han sido estudiadas con mucha profundidad, debido a que se afirma que los suelos finos, como la arcilla y los limos, son prácticamente ininyectables; por tal razón, la información que se encuentra al respecto es muy escasa, por no decir nula, dejando un espacio abierto para la investigación de esta tecnología y un posible aprovechamiento hacia el futuro, en el mejoramiento de suelos con estas características.

3. Proceso experimental

3.1 Caracterización geotécnica del suelo de estudio. El lote objeto del estudio se encuentra localizado en predios de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede central, en el norte de la ciudad de Tunja.

Con el fin de determinar las condiciones geotécnicas del subsuelo se realizaron seis sondeos de reconocimiento, utilizando barreno manual, a una profundidad de cuatro metros, de los cuales se tomaron muestras alteradas e inalteradas con tubos de pared delgada, con el fin de determinar la estratificación del subsuelo y las características geotécnicas para cada nivel de suelo explorado.

De la exploración realizada se encontraron cuatro estratos bien definidos, con las siguientes características:

- **Estrato 1:** De 0,0 m a 0,9 m de profundidad. Limo orgánico color café oscuro con presencia de raíces y un espesor que varía entre 0,6 m y 0,9 m.
- **Estrato 2:** Hasta 2 m de profundidad. Arcilla color amarillo oscuro con presencia de limo y vetas grises, de plasticidad baja a media (límite líquido de 28 a 32%) y consistencia firme (1,4 a 1,8 kg/

cm²). Con un peso específico total (γ_t) que varía entre 2,10 y 2,12 t/m³, un peso específico seco (γ_d) entre 1,81 y 1,82 t/m³, la relación de vacíos (e) está entre 0,46 y 0,47, la porosidad (n), entre 0,31 y 0,32 y la saturación (S) de 0,93 a 0,96 [4].

- **Estrato 3:** Hasta 2,9 m de profundidad. Arcilla color café claro con presencia de limo, de plasticidad baja (límite líquido de 24 a 28%) y consistencia media (0,5 a 0,7 kg/cm²). Con un peso específico total (γ_t) que varía entre 2,05 y 2,09 t/m³, un peso específico seco (γ_d) entre 1,71 y 1,73 t/m³, relación de vacíos (e) entre 0,56 y 0,59, la porosidad (n) entre 0,35 y 0,39 y la saturación (S) de 0,94 a 0,98 [4].
- **Estrato 4:** Hasta 4 m de profundidad. Arcilla color naranja con vetas grises y rojizas de plasticidad media (límite líquido de 40 a 47%) y consistencia muy firme (2,8 a 3,7 kg/cm²). Con un peso específico total (γ_t) que varía entre 2,08 y 2,11 t/m³, un peso específico seco (γ_d) entre 1,74 y 1,76 t/m³, la relación de vacíos (e) está entre 0,58 y 0,60, la porosidad (n) entre 0,37 y 0,38 y la saturación (S) de 0,92 a 0,95 [4].

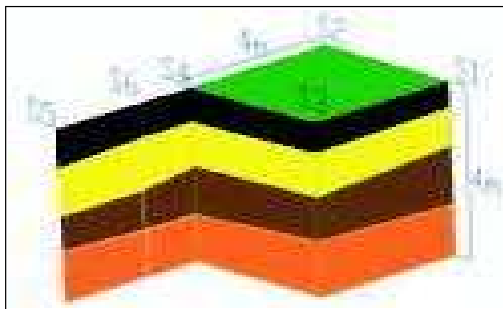


Figura 1. Perfil estratigráfico encontrado

Estrato	Descripción	Características
1	Limo argiloso	MB
2	Arcilla amarilla	CL
3	Arcilla café claro	CL
4	Arcilla naranja	CL

3.2 Proceso de mejoramiento del suelo. El proceso de mejoramiento del suelo se comienza una vez realizada la exploración y la caracterización previa; para este procedimiento se consideran diferentes variables que van a intervenir en las inyecciones de consolidación: es necesario acondicionar el equipo, determinar las presiones de inyección y establecer las dosificaciones de lechada.

3.2.1 Equipo de inyección. El equipo de inyección es la parte más importante en el proceso de inyección; se debe contar con la bomba de inyección, obturadores, flauta de inyección, tubería, manómetro, caneca mezcladora, manguera y válvulas para controlar presiones. Debido al costo y a la dificultad de conseguir un equipo de inyección, se tuvo que adaptar con materiales e implementos más comerciales, complementado con trabajos de ornamentación[2].

Bomba estática: es de flujo a pistón y cuenta con un motor Briggs and Stratton de 10 HP, con un diámetro de succión de 2" y de salida de 1/4". Esta bomba incrementa la presión hasta más de 200 psi, pero por seguridad en su manejo se vio que se podía utilizar fácilmente con presiones de máximo 140 psi.

Foto 1. Bomba estática



Tubería de inyección: está compuesta por una parte fija y otra móvil [2]. La parte fija se denomina, comúnmente, tubo con manguitos, cuya función es permitir el flujo de la lechada hacia el suelo y evitar que esta se devuelva; y la parte móvil es una tubería

de un diámetro que penetre en el tubo con manguitos, la cual tiene como función conducir la lechada hasta dicho tubo a la profundidad requerida.

Obturador: tiene como función evitar que la lechada se devuelva a través del tubo con manguitos [1]; en inyecciones de mayores longitudes se usa doble, con el fin de delimitar con mayor precisión la inyección. Para el sistema se hizo un obturador con empaques de caucho que se adaptaron a un sistema conformado por tres uniones de hierro galvanizado pesado de ½” y dos miples hechos del mismo material, pero en tubería liviana.

Manómetro: tiene como función controlar la presión a la cual se va a inyectar el suelo; se consiguió un manómetro de 240 psi, que fue instalado en una unión de hierro galvanizado de 1¼” de diámetro y 30 centímetros de largo, con rosca en ambos extremos; esta instalación se hizo después de la *te* de salida de la bomba y antes de la válvula de cierre, esto con el fin de controlar la presión por medio del caudal [2].

Caneca mezcladora: tiene como función mezclar el cemento con el agua y mantener la lechada en suspensión mediante la agitación manual, con el fin de evitar el asentamiento de las partículas de cemento y tener una mezcla homogénea de lechada. La caneca tiene una capacidad de 200 litros, una altura de 90 centímetros y un diámetro de 60 centímetros. Se le hizo a la caneca un trabajo de ornamentación y se le instalaron dos soportes a lo ancho, para que mantuvieran fija la manivela que hace el papel de agitador y tiene incorporada la hélice en el fondo de la caneca, y al mismo tiempo permitirle el movimiento para la agitación [2].

Manguera: para conducir la lechada desde la caneca mezcladora hasta la tubería de inyección se cuenta con la manguera de presión de la bomba de 1” de diámetro y de aproximadamente cinco metros de longitud [2]. Debido a que la tubería móvil de inyección es de ½” de diámetro y se necesitaba una mayor longitud para acceder cómodamente a las perforaciones de inyección, se hizo una adaptación con manguera de este diámetro, aumentando la longitud final a diez metros.

3.2.2 Presión de inyección. Para el estudio se manejan profundidades de máximo cuatro metros, por lo que la tensión menor estará en el sentido vertical; esto indica que la falla en el suelo se daría con fisuras que se presentarían perpendicularmente a los taladros y paralelamente al nivel del suelo. Debido a la incertidumbre acerca de las presiones de inyección necesarias en suelos finos, este estudio está basado en el manejo de un rango de presiones en un mismo suelo y con una misma lechada de inyección. El rango de presiones adoptado varía entre 5 psi y 120 psi, que correspondería a $\gamma \cdot h$ y a la máxima presión de fácil manejo que puede generar la bomba utilizada. Las presiones que se manejan se estipulan en el cuadro 1 [5].

Cuadro 1. Presiones de inyección

Profundidad (m)	Presiones (psi)					
	s 1	s 2	s 3	s 4	s 5	s 6
1,5	40	20	120	15	5	10
2,5	60	40	120	30	10	20
3,5	80	60	120	45	15	30

3.2.3 Diseño de la mezcla. En este estudio se utilizará un mortero de cemento, debido a su costo relativamente bajo, así como por la escasa información encontrada acerca de sus efectos en el mejoramiento de suelos finos por medio de la inyección [5].

Se escogió el cemento Pórtland tipo I, dado que se encuentra con mayor facilidad en el mercado y tiene un precio más bajo, por lo que es muy utilizado en diferentes obras de concreto en general. El cemento fue comprado en sacos de 50 kg, de la marca Diamante, producido por la cementera CEMEX, que anunciaba que era utilizado en inyección de suelos por tener mayor finura y resistencia inicial más alta.

La relación agua–cemento escogida para la lechada fue de 5:1, debido a que el suelo presenta una permeabilidad baja y es necesario una baja viscosidad y buena fluidez; además se observó una rigidez aceptable después del fraguado.

3.3 Inyección. En primera instancia es necesario hacer el recubrimiento de los tubos con manguitos con la lechada 1:1, que se realiza con el mismo equipo inyector a lo largo del taladro y alrededor del tubo con manguitos. Es necesario determinar el aumento de la resistencia del mortero agua-cemento en el tiempo, con el fin de conocer la edad adecuada del recubrimiento que se ajuste a las presiones que puede

generar la bomba para lograr romperlo en el momento de inyectar [6].

En la etapa de inyección, además de controlar las presiones ya establecidas para cada taladro, se miden los volúmenes de lechada inyectados y los tiempos de cada inyección, con el fin de determinar los caudales inyectados y con estos realizar posteriores análisis.

Cuadro 2. Caudales de inyección

Sector		Caudal (lt/s)											
Estrato	Prof. (m)	1.ª Inyección						2.ª Inyección					
		s1	S2	s3	s4	S5	s6	s1	s2	s3	S4	s5	s6
2	1,5	0,16	0,11	0,35	0,07	0,06	0,07	0,08	0,07	0,18	0,03	0,02	0,02
3	2,5	0,14	0,09	0,28	0,05	0,04	0,05	0,07	0,05	0,15	0,03	0,01	0,02
4	3,5	0,10	0,08	0,18	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04	0,09	0,01	0,01	0,01

3.4 Caracterización geotécnica de los materiales después del mejoramiento del suelo. Luego de realizado el proceso de mejoramiento del suelo se procedió a realizar una segunda exploración alrededor de los taladros inyectados. Utilizando barreno manual, se hicieron doce sondeos, dos por cada uno de los taladros; la exploración se hizo a una distancia de aproximadamente 40cm entre ejes de taladros, uno hacia el interior del área inyectada y el otro en la parte exterior y a profundidades entre 3,5 m y 4 m.

vetas grises, de plasticidad baja a media (límite líquido de 28 a 32%) y consistencia firme a muy firme (1,52 a 2,28 kg/cm²). Con un peso específico total (γ_t) que varía entre 2,08 y 2,15 t/m³, un peso específico seco (γ_d) entre 1,80 y 1,89 t/m³, la relación de vacíos (e) está entre 0,4 y 0,47, la porosidad (n) entre 0,29 y 0,32 y la saturación (S) de 0,69 a 0,98 [7].

Foto 2. Sondeos alrededor de las inyecciones



Con las muestras obtenidas a partir de los sondeos realizados alrededor de los taladros inyectados se procedió a realizar ensayos de laboratorio, con los cuales se obtuvo la siguiente descripción del material:

- **Estrato 2:** Hasta 2 m de profundidad. Arcilla color amarillo oscuro con presencia de limo y

- **Estrato 3:** Hasta 2,9 m de profundidad. Arcilla color café claro con presencia de limo, de plasticidad baja (límite líquido de 24 a 28%) y consistencia media (0,66 a 0,9 kg/cm²). Con un peso específico total (γ_t) que varía entre 2,06 y 2,13 t/m³, un peso específico seco (γ_d) entre 1,71 y 1,95 t/m³, relación de vacíos (e) entre 0,39 y 0,58, la porosidad (n) entre 0,28 y 0,37 y la saturación (S) de 0,71 a 0,98 [7].

- **Estrato 4:** Hasta 4 m de profundidad. Arcilla color naranja con vetas grises y rojizas de plasticidad media (límite líquido de 40 a 47%) y consistencia muy firme (2,91 a 3,6 kg/cm²). Con un peso específico total (γ_t) que varía entre 2,06 y 2,17 t/m³, un peso específico seco (γ_d) entre 1,74 y 1,95 t/m³, la relación de vacíos (e) está entre 0,43 y 0,61, la porosidad (n) entre 0,3 y 0,37 y la saturación (S) de 0,68 a 0,99 [7].

4. Resultados

En las muestras recuperadas mediante los sondeos se pudo observar cómo era la penetración de la inyección en los diferentes estratos del suelo. En el estrato de consistencia firme se encontraron fisuras horizontales; en el estrato de consistencia media, fisuras horizontales y verticales, y en el estrato de consistencia muy firme, ninguna fisuración, lo que nos indica que la consistencia del suelo tiene una influencia directa en la aplicación de las inyecciones, debido a que la lechada penetra por medio de la fisuración del suelo y no presenta una mezcla con el suelo.

Foto 3. Muestra de estrato de consistencia firme (2) con cemento



Las inyecciones de consolidación son las que se realizan con el objetivo de mejorar las características portantes del terreno y reducir su deformabilidad. Se emplean como recalce de múltiples obras, en túneles como mejora previa o para subsanar instabilidades, en la consolidación de terraplenes, en cimentaciones, etc.

El sistema por el cual se consigue la consolidación del terreno es por relleno de los huecos inyectables, la fracturación del medio y la formación de “lajas” de inyección que comprimen el terreno. La actuación en un número de fases permite la consolidación del terreno hasta el grado deseado. La ventaja de este sistema es el control que ofrece sobre la inyección y el grado de mejora del terreno [8].

Las propiedades físicas del suelo presentan cambios causados por la inyección, pero no son significativos; en cuanto a las propiedades mecánicas, la resistencia a la compresión inconfina presenta un incremento aceptable, mas no sucede lo mismo con la cohesión,

fricción y coeficientes de compresibilidad. Todo esto se traduce en un mejoramiento en la capacidad portante del terreno, principalmente en los estratos dos y tres, y una pequeña disminución de asentamientos.

5. Conclusiones

- Las inyecciones de consolidación en suelos finos no penetran de manera uniforme, sino que forman pequeñas fisuras de inyección tipo lajas que comprimen el suelo y, por ser de un material más rígido, proporcionan una estructura que mejora el comportamiento, principalmente su capacidad portante.
- El estrato de consistencia media presenta mejores resultados en su comportamiento frente a la inyección, debido a su menor resistencia a esfuerzos, lo cual permite que se fisure más fácilmente y penetre la lechada.
- El estrato firme, que se encuentra a 1,5 m de profundidad aproximadamente, también presenta cambios significativos, pero son generados por la fisuración horizontal que se da debido a su superficialidad, y, por lo tanto, la mejora disminuiría al encontrarse a una profundidad mayor.
- En el momento de la inyección es fundamental controlar las presiones, ya que si son pequeñas no contribuyen al mejoramiento, y si son muy altas pueden desestabilizar el suelo, causando deformaciones y posibles daños a estructuras aledañas.
- Medir presiones y caudales de inyección es indispensable, ya que da una idea del comportamiento de la lechada en el suelo. Para esto es necesario evitar las vibraciones de la bomba, dado que afectan las lecturas del manómetro.
- La adaptación de un equipo inyector es sencilla; al contar con una bomba de flujo a pistón, lo demás se adapta con tubería y elementos que se consiguen fácilmente en el mercado.

- En este tipo de suelos la permeabilidad no se ve afectada, ya que no hay un llenado de los vacíos del suelo, a diferencia de la inyección en arenas, sino que se forman las ya mencionadas lajas de inyección.
- La deformabilidad del suelo no se ve afectada en dimensiones considerables debido al tipo de lechada, que no tiene la densidad y fricción interna suficientes para comprimir el suelo.
- El cambio generado en los distintos parámetros del suelo se relaciona directamente con la presión de inyección, aunque esta variación no es proporcional. El único parámetro que presenta una variación significativa no derivada por errores en los ensayos es la resistencia a la compresión confinada.

6. Recomendaciones

- Realizar el estudio en suelos finos de consistencia muy blanda a mayor profundidad, para identificar los cambios generados por la inyección.
- Hacer un estudio con diferentes tipos de productos para la lechada de inyección, con el fin de determinar cuál es el más adecuado para inyectar en suelos finos.
- Al realizar la inyección con cemento se recomienda utilizar un producto que disminuya la sedimentación, pero que no aumente la viscosidad.
- Estudiar el comportamiento de la lechada agua-

cemento en arcillas dispersivas, ya que son comunes en la región y podrían verse afectadas por la fluidez de este tipo de producto de inyección.

- Trabajar un rango de presiones más elevadas, hasta el punto de fallar el suelo y generar deformaciones en superficie, con el fin de identificar apropiadamente las presiones óptimas y las deficiencias del equipo.
- Realizar un recubrimiento con otros productos, como arcilla y arena compactada, que puedan funcionar correctamente y disminuyan los costos de la inyección.

7. Referencias

- [1] MERRIT, Loftin, Ricketts: *Manual del ingeniero civil*. Tomo I. México, 1999. Cuarta edición.
- [2] CAMBEFORT, Henri: *Inyección de suelos*. Barcelona, 1968
- [3] RAMÍREZ, Óscar: *Apuntes de clase geotecnia II*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Primera edición 2004.
- [4] RAMÍREZ, Óscar: *Apuntes de clase geotecnia II..* Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tercera edición, 2004.
- [5] Microcementos Spinor, www.microcementos.com, enero 2004.
- [6] Soletanche – Bachy, www.soletanche-bachy.com, enero 2004.
- [7] HERNÁNDEZ, Félix: *Manual de manejo del equipo triaxial en pruebas a compresión aplicadas a suelos cohesivos*. 1992
- [8] Geotecnia y Cimientos, S.A., www.geocisa.com, enero 2004

Fecha de recepción: 28 de junio de 2006

Fecha de aprobación: 5 de julio de 2006

