



# GENERACIÓN DE GRANDES CAVIDADES EN ARCILLAS PARA ALMACENAR MATERIALES

■ Heriberto Echezuría

email: heriberto.echezuria@yvsite.com

Universidad Católica Andrés Bello

Caracas - Venezuela

Fecha de Recepción: 29 de Septiembre 2013

Fecha de Aceptación: 13 de Diciembre de 2013

## RESUMEN

Se lograron almacenamientos de hasta 49 m<sup>3</sup> de fluidos viscosos en arcillas con diferentes condiciones. El fluido inyectado se almacena en cavidades similares a bulbos elipsoidales. Los ejes principales de los bulbos pueden ser orientados según sea requerido por el ingeniero. Para el bulbo de 49 m<sup>3</sup> el mismo se orientó verticalmente con eje principal de 5,8 m y eje menor de 4,0 m. Por otra parte, se determinó experimentalmente el umbral de viscosidad por encima del cual el bulbo puede crecer sin límite mientras que por debajo del mismo solo ocurre fracturamiento del suelo. Todos los volúmenes inyectados fueron medidos y permitieron la verificación de las dimensiones de los bulbos. La verificación de la forma del bulbo fue realizada tanto con técnicas tomográficas como ensayos SPT. Al crecer, el bulbo puede causar la falla del suelo por encima del mismo hasta la superficie

del terreno lo cual fue estudiado con el uso de teorías de anclajes porque el proceso está controlado por la profundidad y tamaño del bulbo.

Las presiones de poros generadas en el proceso indican que el flujo es del suelo circundante hacia el bulbo. Las técnicas desarrolladas durante el proceso de expansión de cavidades tienen aplicaciones para disposición de materiales en áreas delicadas, para formar lentes con buenas propiedades de ingeniería en perfiles de suelos muy blandos o columnas de materiales granulares a bajo costo en los mismos perfiles.

**Palabras Claves:** Inyección en arcillas, desplazamiento de arcillas, almacenamiento en arcillas, soluciones ambientales, almacenamiento de sustancias en el terreno.

se materials increase dramatically the operation costs. In addition, those techniques can also be applied to create lenses of soils with improved engineering properties in poor geotechnical profiles to fund with piles or to form columns of granular materials at low cost.

**Keywords:** Injection in clay, clay displacement, storing in clay, environmental solutions, storing substances in the ground.

## GENERATION OF LARGE CAVITIES IN CLAY FOR STORING MATERIALS

### ABSTRACT

It was possible to store up to 49 m<sup>3</sup> of viscous fluids in clays with different conditions. The injected fluid was stored in ellipsoidal cavities. The orientation of the ellipsoid axes can be defined according to injection needs. For the case of the 49 m<sup>3</sup> bulb, it was oriented vertically with a major axis of 5,8 m and a horizontal axis of 4,0 m. It was also demonstrated experimentally that there exists a viscosity threshold above which the bulb can grow without limit, whereas below it only soil fracturing occurs. All the amounts of fluid injected were measured to compare and verify bulb sizes. Verification of the shape of the bulb was performed by tomographic techniques and SPT tests. It was detected that as the bulb grew it could cause failure of the ground above it up to the surface. This failure process was studied with the aid of anchor theories because it was controlled by the depth and size of the bulb.

Induced pore pressures during injection indicate that flow during dissipation occurs from the surrounding soil towards the bulb. The techniques developed during the process of cavity expansion can be applied to dispose materials in delicate areas for which transportation of tho-

## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando se inyecta un fluido en un depósito de suelo arcilloso pueden ocurrir varias respuestas dentro de la masa de suelo, las cuales dependen principalmente de la viscosidad del fluido inyectado, de los esfuerzos de confinamiento y de la resistencia al corte no drenado del suelo. Consideremos primeramente, el caso en el que la viscosidad del fluido inyectado es muy baja y el fluido es inyectado con suficiente presión. En este caso, el suelo experimentará una fractura debido a que el fluido es incapaz de moverse dentro de los espacios porosos del suelo a causa de la bajísima permeabilidad de las arcillas.

Generalmente, las fracturas se presentan como grietas que aparecen en la dirección del esfuerzo más grande presente en la masa de suelo, simplemente porque en esa dirección el confinamiento es producido por los menores esfuerzos en el suelo, los cuales son normales a los anteriores. A medida que progresa la fractura, esa dirección puede cambiar y, eventualmente, pueden alcanzar la superficie del terreno. Este proceso es conocido como “digitación” o “ramificación” debido a que el patrón de grietas se asemeja a una mano o a los extremos de una rama de árbol.

Ahora bien, a medida que aumentamos la viscosidad del fluido, manteniendo los mismos niveles de presión, disminuirá la velocidad del fluido en las fisuras formadas y por ende, también disminuirá la velocidad de propagación de la grieta en la masa de suelo. Simultáneamente, si la presión es suficiente, comienza entonces a ensancharse progresivamente la fisura y a almacenarse fluido dentro de la masa de suelo.

Ello se debe a que la energía requerida para mantener el flujo en una fisura, que podemos comparar con un ducto de pequeño diámetro, resulta mayor que la requerida para desplazar lateralmente el suelo en la dirección de su menor esfuerzo confinante. En consecuencia, cuando la viscosidad y la presión son suficientemente grandes, las fisuras o ductos comienzan a ensancharse y el suelo almacena el fluido inyectado en las mismas.

La inyección de fluidos viscosos ha sido utilizada comúnmente para diversas actividades en la ingeniería civil, entre ellas el recalce de fundaciones y el mejoramiento de suelos pobres. No obstante, todas esas aplicaciones implican la inyección de pequeños volúmenes de fluido los cuales no alcanzan los 5 m<sup>3</sup>. El objetivo de este trabajo es maximizar la cantidad de material que puede ser almacenado en una cavidad desarrollada en arcilla de manera de alcanzar 50 m<sup>3</sup> o más. En este trabajo se verifica el comportamiento del material inyectado y la respuesta de suelo receptor a fin de establecer los

parámetros que controlan el proceso y establecer las diferencias con las inyecciones comúnmente utilizadas en la ingeniería.

Las cavidades pueden ser formadas mediante inyección de fluidos viscosos o con la ayuda de explosivos. Durante la investigación se realizaron los dos tipos de expansiones aunque aquí solamente se presentarán los resultados de aquellas logradas por inyección las cuales son las de mayor aplicación en la ingeniería.

Todos los aspectos antes indicados fueron medidos en experimentos realizados en el laboratorio y en el campo en los cuales se inyectaron distintos fluidos a varias profundidades en perfiles geotécnicos que fueron desde muy blandos a firmes. Los mismos condujeron a la patente US Patent No 6,491,100 [1]. A continuación se describen los ensayos de campo y laboratorio, además de los análisis y la discusión de sus resultados.

## 2. EXPERIMENTOS EN LABORATORIO

Sabemos que la mezcla de agua con sólidos suspendidos es una forma muy sencilla de obtener fluidos viscosos cuya viscosidad puede ser ajustada al aumentar la cantidad de sólidos en la mezcla. En consecuencia, las primeras pruebas de laboratorio se realizaron para establecer la variación de la viscosidad de mezclas de agua con una arcilla denominada Barbotina, comúnmente utilizada para preparación de cerámicas. En esas pruebas se midió la viscosidad a medida que aumentaba la cantidad de sólidos suspendidos en la misma.

En la Fig.1 se muestra la correlación entre la viscosidad del fluido, mostrada en el eje de las ordenadas, con el contenido de humedad del fluido preparado como mezcla de sólidos y agua, lo cual se muestra en el eje de las abscisas. Nótese que a medida que aumenta el contenido de humedad, disminuye la viscosidad de la mezcla y viceversa.

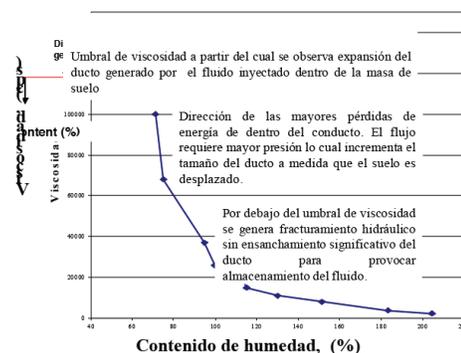


FIG. 1 Correlación entre la viscosidad de un fluido y el contenido de humedad de la mezcla de agua y sólidos utilizados para preparar dicho fluido

Posteriormente, esas suspensiones de sólidos en agua se inyectaron en el laboratorio en una masa de suelo con muy baja resistencia al corte ( $\sim 0,01 \text{ kg/cm}^2$ ) y confinada a muy bajos niveles de esfuerzos ( $\sim 0,1 \text{ kg/cm}^2$ ). Durante el proceso se utilizó un colorante para distinguir adecuadamente el material inyectado del suelo receptor. En la misma figura 1 se describe el comportamiento del suelo receptor con la viscosidad del fluido inyectado. Como se indica en esa figura, para viscosidades por debajo de los 10.000 cps se observó sólo el fracturamiento o la digitación en el suelo, mientras que para viscosidades mayores ocurría el ensanchamiento de las fracturas con almacenamiento de fluido.

El procedimiento seguido en el laboratorio y sus resultados serán descritos con la ayuda de la Fig 2. En la Fig. 2.a se observa la muestra de suelo receptor contenida en un recipiente con paredes transparentes. Por otra parte, en la Fig. 2.b se muestra el resultado de un ensayo donde ocurrió la expansión de la masa de suelo, en el cual se utilizó una viscosidad superior a los 10.000 cps. La forma de la cavidad obtenida en el experimento 2.b se ilustra en la Fig. 2.d.

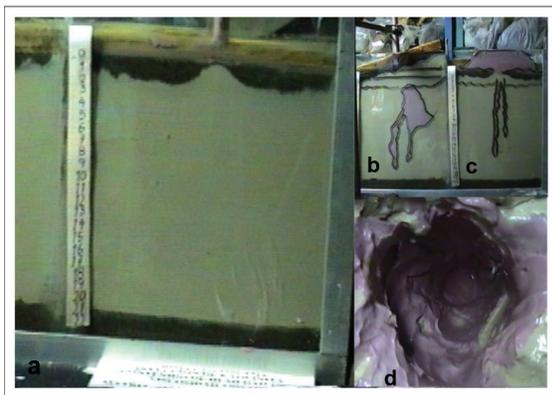


FIG. 2 Distintos pasos seguidos durante el proceso de inyección de fluidos con distintas viscosidades en una masa de arcilla para lograr la expansión de una cavidad capaz de almacenar el fluido: a) perfil de la muestra receptora visto a través de la pared de vidrio del envase, b) formación de cavidad por desplazamiento del suelo receptor, digitación con acumulación del fluido inyectado en la superficie de la muestra y d) vista interior de la cavidad mostrada en b

En el caso de la Fig. 2.c se aprecia el resultado de otro ensayo en el cual sólo se obtuvo el fracturamiento o la digitación en el suelo con propagación de la grieta hasta la superficie y la acumulación de fluido en el tope de la muestra de suelo alrededor del punto de inyección. En este caso, la viscosidad de inyección fue inferior a los 10.000 cps.

Una vez entendido el proceso de formación de fracturas y expansión de las cavidades para almacenamiento de fluidos en el laboratorio, se realizó otro grupo de

experimentos en el campo similares a los anteriormente descritos para el laboratorio a fin de escalar los resultados a otros valores de la resistencia al corte y del confinamiento del suelo. Estos experimentos se describen en la próxima sección.

### 3. PRUEBAS DE INYECCIÓN EN CAMPO

Las pruebas de inyección en el campo se realizaron; primeramente, en una arcilla de consistencia de muy blanda a blanda cuya resistencia al corte en condiciones no drenadas estaba entre los  $0,1 \text{ kg/cm}^2$  y los  $0,30 \text{ kg/cm}^2$ . Nótese que estos valores corresponden a un orden de magnitud superior a los utilizados en el laboratorio.

Al igual que en el caso de los ensayos de laboratorio, se inyectó una mezcla teñida con un color característico de suelo y partículas suspendidas cuya viscosidad podía ser ajustada hasta lograr el almacenamiento del fluido inyectado apropiadamente. Durante el proceso de inyección se medía el volumen de material inyectado a fin de establecer con certeza cuanto material se estaba utilizando en el proceso. Posteriormente, se verificaba la forma del bulbo formado y se comparaban los volúmenes para comprobar si estaba ocurriendo el almacenamiento de fluido en lugar del fracturamiento o digitación.

Las pruebas debieron repetirse varias veces debido a que en el campo la viscosidad de 100.000 cps solamente permitía una cantidad muy pequeña de fluido y se observaba el fracturamiento hasta la superficie. Una vez completados varios ciclos de pruebas en distintos tipos de suelos y viscosidades se observó que la viscosidad requerida para formar almacenamiento dependía de la resistencia al corte del suelo, tal como se ilustra en la Fig.3.

Como se observa en dicha figura, la curva de la correlación inferior corresponde a la viscosidad por debajo de la cual sólo se obtiene fracturamiento o digitación en el suelo. En otras palabras, por debajo de la misma no es posible almacenar fluido sino fracturar el suelo.

Por otra parte, la curva superior define la viscosidad a la cual el almacenamiento efectivo real del fluido inyectado comienza a suceder en el suelo sin observar fracturamiento o digitación adicional. En consecuencia, si para un valor cualquiera de la resistencia al corte no drenado la viscosidad es mantenida por encima del valor máximo el suelo almacenará fluido sin presentar fracturamiento pues es más fácil desplazar el suelo lateralmente que fracturarlo. Si la viscosidad es mantenida entre ambas viscosidades, el almacenamiento será incipiente y

también ocurrirá el fracturamiento o digitación del suelo. Los valores de 0,12 kg/cm<sup>2</sup> y 0,24 kg/cm<sup>2</sup> indicados en la Fig. 3 son para ilustrar los resultados de las pruebas en los párrafos siguientes.

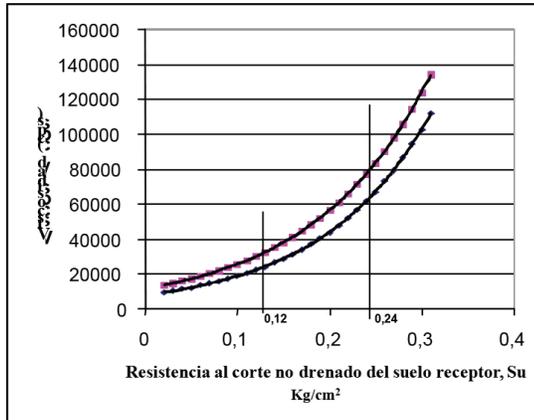


FIG. 3 Correlación entre la viscosidad del fluido inyectado y la resistencia al corte no drenado del suelo receptor.

A continuación se describen los resultados de las pruebas de campo para los valores de la resistencia al corte no drenado indicados en la figura 3 de 0,12 kg/cm<sup>2</sup>. Para ese caso, la viscosidad a la cual se observó la digitación del suelo receptor fue de alrededor de 20.000 cps, la cual define la posición de la curva inferior de la figura 3. Nótese que ese valor es aproximadamente el doble del observado para obtener la digitación en el laboratorio. Por otra parte, el almacenamiento efectivo del fluido inyectado, para esta resistencia al corte, se logró para una viscosidad de alrededor de los 32.000 cps, la cual define la posición de la curva superior. Para el caso de resistencia al corte de 0,24 kg/cm<sup>2</sup> se tiene el umbral inferior en 60.000 cps y el superior en 80.000 cps.

#### 4. GEOMETRÍA DE LA CAVIDAD FORMADA DURANTE EL ALMACENAMIENTO DEL FLUIDO

Tal como mencionamos, durante el proceso de inyección de todos los experimentos fue medido el volumen de fluido el cual, en el caso de la primera inyección en la que se logró el almacenamiento del fluido inyectado a la resistencia al corte de 0,12 kg/cm<sup>2</sup>, fue de unos 4,5 m<sup>3</sup>. Posteriormente, se utilizaron técnicas tomográficas en sitio para verificar la forma en que se había almacenado el fluido inyectado en la masa de suelo. Esto se ilustra en la Fig. 4.

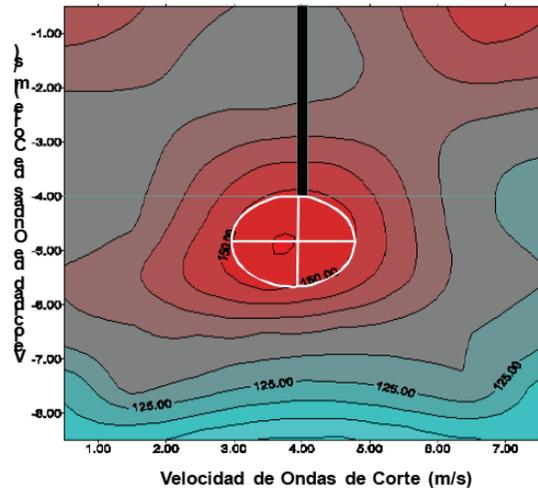


FIG. 4 Imagen tomográfica del perfil geotécnico donde se realizó la inyección de 4,5 m<sup>3</sup> de fluido viscoso. Nótese la coincidencia de la zona de altas velocidades con la forma de un bulbo elipsoidal, lo cual confirma que la arcilla blanda receptora fue desplazada para almacenar el fluido inyectado.

Con la ayuda de la imagen tomográfica de la figura 4 se estableció que la forma del fluido almacenado durante la inyección se aproxima a un elipsoide de revolución con eje mayor horizontal y eje menor vertical. De la misma manera, con esa misma figura y el volumen inyectado se ajustaron las dimensiones de los ejes del elipsoide. Considerando que el volumen inyectado en este caso fue de unos 4,5 m<sup>3</sup>, los ejes del elipsoide resultaron de 2,3 m en la dirección horizontal y 1,73 m en la dirección vertical.

En otros ensayos para esta misma resistencia al corte de 0,12 kg/cm<sup>2</sup> y con la viscosidad de 32.000 cps se logró inyectar 11 m<sup>3</sup> a 9 m de profundidad. Para otro de los ensayos con esa misma viscosidad pero inyectado a 6 m de profundidad, el volumen medido durante la inyección fue de 9 m<sup>3</sup> y se verificó el almacenamiento del fluido mediante un ensayo SPT. Dicho ensayo fue realizado muy cerca del punto de inyección, tal como se ilustra en la Fig. 5. Nótese que el número de golpes baja a cero entre 3,9 y 6,1 m, es decir, prácticamente 2 m. Si utilizamos el volumen inyectado (9 m<sup>3</sup>) y un elipsoide de revolución, obtenemos un eje vertical de 2,04 m y un eje horizontal de unos 2,9 m. La similitud entre estos valores soporta el hecho de que el suelo está almacenando el fluido inyectado.

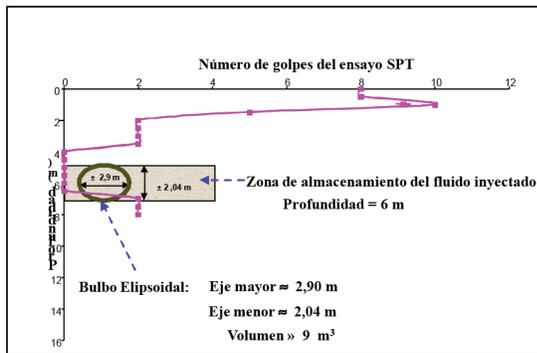


FIG. 5 Verificación del almacenamiento de fluido viscoso inyectado a 6 m en un suelo blando. Si comparamos el eje vertical de un bulbo elipsoidal de  $9 \text{ m}^3$  obtenemos  $2,04 \text{ m}$  que se parece mucho a los  $2,0 \text{ m}$  verificados con el ensayo SPT.

Todas las otras pruebas con viscosidades menores que los  $32.000 \text{ cps}$  en este perfil con resistencia al corte no drenado de  $0,12 \text{ kg/cm}^2$  no lograron la formación de bulbos con almacenamiento efectivo del fluido inyectado. En esos casos, la mayor parte del fluido retornaba muy rápidamente al inicio de la inyección hasta la superficie del terreno por grietas formadas muy próximas al punto de inyección de forma similar a la observada en el laboratorio. Este hecho ponía en evidencia que no había almacenamiento alguno en la prueba con dichas viscosidades sino que el proceso de inyección sólo producía la digitación en el suelo con retorno inmediato del fluido a la superficie del terreno.

### 5. MAXIMIZACIÓN DEL TAMAÑO DEL ELIPSOIDE

Adicionalmente a los aspectos antes descritos para lograr el almacenamiento del fluido, se estudió hasta donde podía hacerse crecer el bulbo elipsoidal a fin de lograr la maximización del tamaño del mismo. Durante este proceso se observó que el suelo movilizado por encima del bulbo fallaba, con un mecanismo similar al de un anclaje[2], cuando la profundidad de inyección era más pequeña que la longitud crítica de un anclaje de diámetro equivalente al área horizontal del bulbo. Este mecanismo se ilustra en la Fig. 6.

La evidencia de esta falla se obtuvo al observar que luego de inyectar un volumen considerable de fluido, lo cual aseguraba que estaba ocurriendo el almacenamiento del mismo según la verificación antes indicada con las pruebas SPT, aparecían varios puntos de afloramiento y acumulación de fluido en la superficie del terreno a distancias del punto de inyección que correspondían con el cono de falla indicado en la Fig. 6.

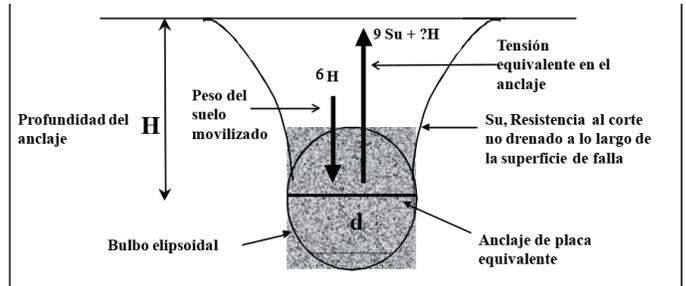


FIG. 6 Diagrama esquemático del mecanismo de falla de un anclaje de diámetro,  $d$ , construido a una profundidad,  $H$ . Nótese el cono truncado de suelo movilizado por encima del mismo.

Por otra parte, también se observó que dicho reflujó ocurría con una caída importante de las presiones de inyección tal como se muestra en la Fig. 7. Adicionalmente, se observó que el terreno entre el punto de inyección y el afloramiento de fluido se levantaba y descendía con cada movimiento de los pistones de la bomba.

La comparación de la presión máxima observada con la presión esperada para un anclaje del mismo diámetro construido a la profundidad de la inyección indicó que las mismas eran muy parecidas, según se ilustra en la Fig. 7.

Por otra parte, las mediciones de las distancias desde los puntos de afloramiento del fluido después de la caída de la presión al punto de inyección, así como, el tamaño estimado del bulbo para ese momento y las presiones equivalentes de un anclaje con el tamaño del elipsoide permitieron asegurar que se trataba de un mecanismo de falla por desprendimiento del suelo por encima del bulbo muy similar al observado durante la falla de un anclaje.

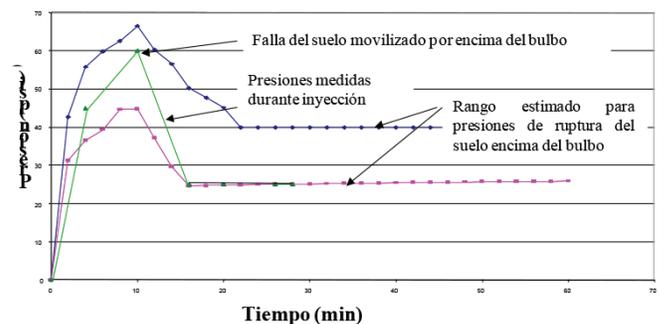


FIG. 7 Presiones estimadas y medidas para alcanzar la falla del suelo por encima del bulbo elipsoidal asumiéndolo como un anclaje equivalente. La profundidad de inyección fue de  $9 \text{ m}$  y el volumen inyectado de  $12 \text{ m}^3$ .

La falla en estas condiciones es una consecuencia del desbalance entre el peso del suelo movilizado por encima del bulbo y la fuerza resultante al multiplicar la presión de inyección por el área horizontal del bulbo.

Véase la Fig.6. El resultado es el desprendimiento del cono truncado de suelo por encima del bulbo, lo cual genera una superficie de falla a través de la cual puede ascender el fluido inyectado hasta la superficie.

La única forma de hacer crecer el bulbo a partir de ese momento para maximizar su tamaño consistía en aumentar la viscosidad del fluido para evitar su flujo a través de la superficie generada por la falla del suelo por encima del bulbo. En otras palabras, la energía requerida para establecer el flujo por la fisura debe ser mayor que la energía requerida para continuar expandiendo el suelo lateralmente. En la Fig. 8 se muestran las viscosidades mínimas que permiten hacer crecer el bulbo, aún después de fallado el suelo movilizado sobre el mismo, en función de la resistencia al corte no drenada del suelo receptor. Nótese que es la misma Fig. 3 pero ahora con el eje de las ordenadas en escala logarítmica y con el eje de las abscisas expandido para permitir suelos con resistencia al corte no drenada en el rango de las arcillas firmes.

Las líneas inferiores de la figura 8 corresponden a las contenidas en la figura 3 y se ha añadido la línea superior la cual define la viscosidad mínima para la cual el elipsoide puede continuar creciendo después de desprendido el suelo por encima del bulbo. Es oportuno destacar la diferencia entre los tamaños de los bulbos inyectados para las viscosidades indicadas por la línea superior de la Fig. 8.

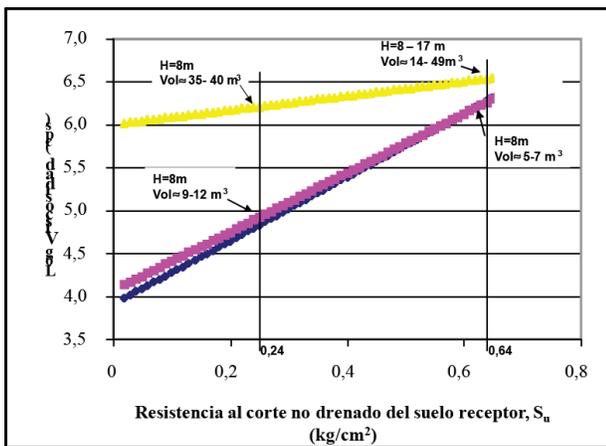


FIG. 8 Correlación entre el logaritmo de la viscosidad del fluido inyectado y la resistencia al corte no drenado del suelo receptor indicando la diferencia entre los umbrales para digitación y para el máximo crecimiento del bulbo elipsoidal con el fluido inyectado.

Consideremos por ejemplo, la resistencia al corte de 0,12 kg/cm<sup>2</sup> que hemos venido describiendo, en este caso el bulbo alcanzó los 35 m<sup>3</sup> en comparación con los 11 m<sup>3</sup>

logrados con las viscosidades de las líneas inferiores. En otras palabras, se logró en términos prácticos triplicar el volumen del bulbo. Es bueno destacar que aunque el suelo por encima del bulbo tendía a levantarse con cada movimiento del pistón de la bomba, el mismo volvía a descender demostrando que el desplazamiento lateral del suelo seguía ocurriendo y era vencido por el peso del elemento de suelo por encima del bulbo.

## 6. ORIENTACIÓN DE LOS EJES DEL ELIPSOIDE

La orientación de los ejes principales del elipsoide puede ser controlada durante el proceso de inyección. En la Fig. 9 se muestran los bulbos estimados en dos casos en los que se inyectaron 14 m<sup>3</sup> y 49 m<sup>3</sup>, respectivamente, en un suelo con resistencia al corte no drenada de aproximadamente 0,64 kg/cm<sup>2</sup>. En estos dos casos, se tomaron medidas para que el eje mayor quedara en la dirección vertical y el menor en la horizontal.

Para la estimación del tamaño del elipsoide de la Fig.9 se utilizaron pruebas SPT cercanas al punto de inyección y se compararon con las estimaciones de las dimensiones de un elipsoide de volumen igual al inyectado. En esos casos las dimensiones para el bulbo de 49 m<sup>3</sup> son unos 5,8 m para el eje vertical y unos 4 m para el horizontal. Para el bulbo de 14 m<sup>3</sup> tenemos 3,8 m para el eje vertical y 2,7 m para el horizontal. El bulbo de 14 m<sup>3</sup> fue inyectado a 8 m de profundidad, mientras que el de 49 m<sup>3</sup> fue inyectado a 17 m de profundidad.

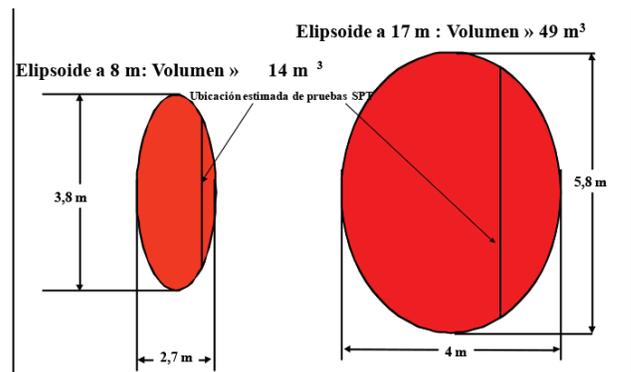


FIG. 9. Verificación del almacenamiento de fluido inyectado en suelo con resistencia al corte,  $S_u=0,64$  kg/cm<sup>2</sup>. Los ejes de los bulbos elipsoidales para volúmenes de 14 m<sup>3</sup> y 49 m<sup>3</sup> se ajustan a las mediciones con el ensayo SPT. La dirección de los ejes principales del elipsoide fueron cambiadas de manera que el mayor fuese vertical y el menor horizontal.

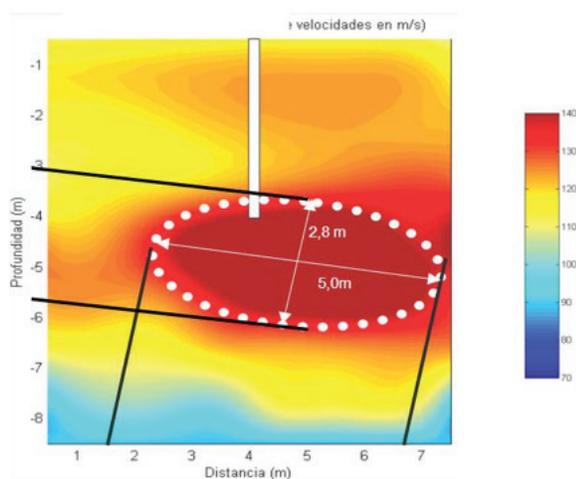


FIG. 10. Verificación de almacenamiento de fluido viscoso a 5 m de profundidad en un suelo con resistencia al corte,  $S_u=0,10$  a  $0,12$  kg/cm<sup>2</sup>. La forma de un bulbo elipsoidal de unos 25 m<sup>3</sup> coincide bastante bien con la zona de máximas velocidades lo cual permite inferir el almacenamiento del fluido.

Por otra parte, en la FIG. 10 se muestra otro elipsoide verificado en un suelo con resistencia al corte no drenado entre  $0,10$  a  $0,12$  kg/cm<sup>2</sup>, para el cual el eje principal se planificó en la dirección horizontal. En este caso, con base en el volumen inyectado (25 m<sup>3</sup>) se estimó un eje mayor de aproximadamente 5 m y uno menor 2,8 m para el elipsoide, considerando las zonas de altas velocidades de la tomografía. Nótese que en este caso el bulbo quedó ligeramente excéntrico con respecto al punto de inyección, sin embargo, esto puede ser ajustado para que sea completamente centrado.

## 7. ALTERACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO

Cuando se trata de maximizar el tamaño del bulbo inyectado hay que prestar mucha atención al aumento en la cota del terreno producto del crecimiento del eje vertical del bulbo. En otras palabras, si la viscosidad se mantiene por encima de los valores indicados por la línea superior de la Fig. 8, el tamaño del bulbo crecerá sin problemas aunque el suelo por encima del mismo falle. En esos casos el crecimiento del bulbo será controlado por otros factores como las deformaciones permisibles en la superficie del terreno.

Las evidencias de las alteraciones de la superficie del terreno a causa de las inyecciones fueron medidas con arreglos topográficos utilizando una malla alrededor del punto de inyección, cuyos resultados se resumen en la Fig. 11. En la misma se aprecia que la deformación

en la superficie depende tanto del volumen inyectado como de la profundidad del punto de inyección. Con esta figura se puede definir el tamaño del bulbo para las potenciales aplicaciones prácticas estableciendo la profundidad ideal para un tamaño de bulbo deseado y manteniendo las deformaciones en la superficie dentro de los límites permisibles.

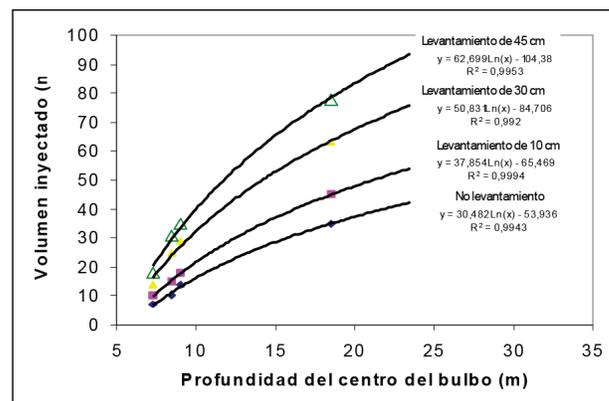


FIG. 11. Correlación entre la profundidad de inyección y el volumen de fluido con el desplazamiento vertical de la superficie del terreno, preparada con los datos de este trabajo.

## 8. PRESIONES DE INYECCIÓN EN LA BOMBA

Tal como se indicó antes, las presiones de inyección medidas en la bomba alcanzaban un máximo luego del cual disminuían. Dichas presiones resultaban muy parecidas a las presiones máximas obtenidas para anclajes equivalentes al tamaño de los bulbos si la profundidad correspondía con la altura crítica del anclaje. Al comparar las máximas presiones de inyección con las presiones calculadas con la teoría de anclajes resultó que las mismas resultaban muy cercanas. En consecuencia, para fines prácticos las máximas presiones se pueden estimar con dicha teoría. Esto se ilustra en las Figs. 6 y 7.

En todo caso, durante las inyecciones en los ensayos de campo las máximas presiones absolutas registradas estuvieron entre  $7$  y  $14$  kg/cm<sup>2</sup> (100-200 psi). Los valores más altos ocurrieron para los casos con perfiles geotécnicos más rígidos y correspondían a las máximas presiones previas a la falla del suelo movilizado por encima del bulbo. Una vez alcanzado dicho máximo, la presión estuvo controlada por el crecimiento del bulbo y se mantuvo en valores muy cercanos a los  $3,5$  kg/cm<sup>2</sup> (50 psi). Por otra parte, debido a que el bulbo está conectado con

la atmosfera, las presiones en el mismo corresponden a las estimadas para condiciones geostáticas.

Es oportuno destacar que las inyecciones realizadas en todas las pruebas de campo antes descritas fueron realizadas con bombas de pistón cuyas presiones máximas de operación estaban por debajo de las 600 psi.

## 9. PRESIONES DE POROS EN EL TERRENO

En varios ensayos se midió el desarrollo de las presiones de poros en el terreno. En ellas se observó que las presiones en el suelo circundante aumentaban a medida que se desarrollaba el proceso de inyección. A tal efecto se colocaron varios piezómetros a distintas profundidades y a distintas distancias del punto de inyección de manera de contar con datos suficientes en el perfil geotécnico.

En la Fig. 12 se incluye la interpretación de las condiciones en el perfil geotécnico antes de iniciar las inyecciones. En la Fig. 13 se muestran las presiones en el terreno al final de la inyección del bulbo de 49 m<sup>3</sup>. Nótese que el bulbo creció verticalmente y que para una profundidad de 12 m las presiones pasan de aproximadamente de 13 kg/cm<sup>2</sup> a 30 kg/cm<sup>2</sup>. Esto significa un aumento de aproximadamente 17 kg/cm<sup>2</sup> como producto del proceso de expansión de la cavidad del bulbo.

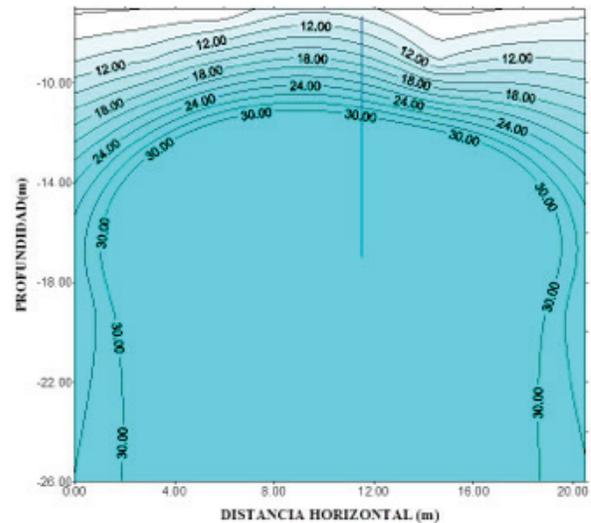


FIG.13 Distribución de presiones de poros (kg/cm<sup>2</sup>) en el perfil geotécnico al final de la inyección del bulbo de 49 m<sup>3</sup>.

En la Fig. 14 se incluye la interpretación del exceso de presiones de poros tres meses después de la inyección del mismo bulbo. Como se aprecia las presiones se han disipado y el patrón de las presiones indica que ha ocurrido flujo hacia el bulbo desde el terreno circundante. Esto es de esperar debido a que como mencionamos antes, las presiones en el bulbo al final de la inyección corresponden a las condiciones muy cercanas a las hidrostáticas en la parte superior, aunque hay evidencias de que hay succión hacia el bulbo.

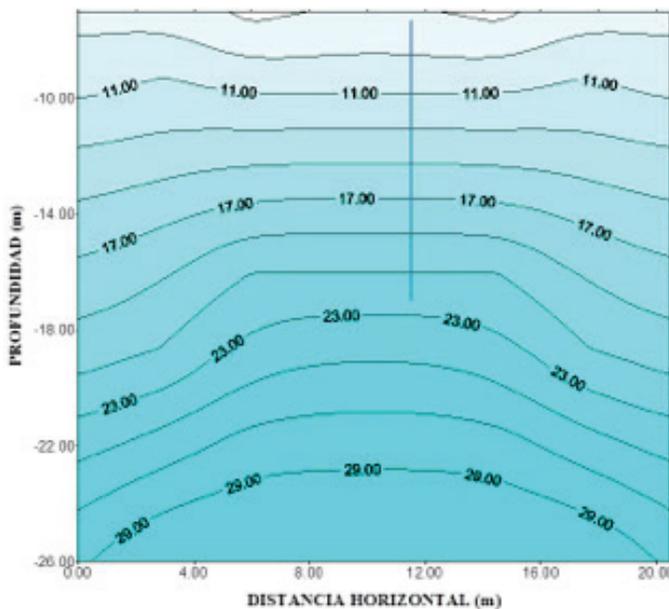


FIG.12 Distribución de presiones de poros (kg/cm<sup>2</sup>) en el perfil geotécnico antes de inyectar el bulbo de 49 m<sup>3</sup>.

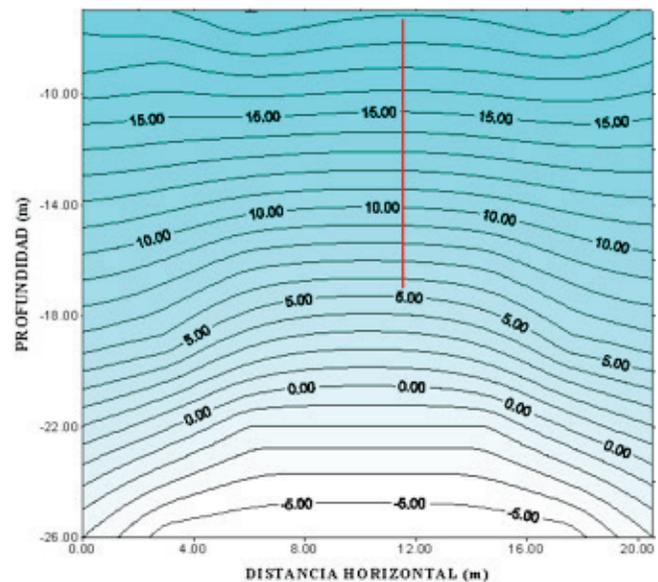


FIG. 14 Distribución del exceso de presiones de poros (kg/cm<sup>2</sup>) tres meses después de la inyección del bulbo de 49 m<sup>3</sup>.

## 10. APLICACIONES

Una primera aplicación de las técnicas antes descritas es la disposición de materiales estabilizados en zonas frágiles en las que los desechos de las operaciones no pueden ser dejados en la superficie del terreno pues impactarían negativamente el ecosistema. Un ejemplo de esto son las perforaciones para exploración petrolera en zonas prístinas o cercanas a las costas donde el transporte de los desechos de perforación encarece mucho esas operaciones.

A tal efecto se puede tratar el material proveniente de la perforación en el mismo taladro para luego inyectarlo con estas técnicas hasta profundidades en las que no representen un impacto al ambiente. En este sentido hay que destacar que no habría que esperar lixiviación desde el bulbo pues el material ya habría sido tratado para hacerlo inocuo y además, el proceso garantiza que el flujo después de la inyección es desde el suelo circundante hacia el bulbo.

Otra aplicación potencial de estas técnicas es la generación de lentes de suelo artificial con buenas propiedades de ingeniería para apoyar fundaciones profundas. La ventaja de estas técnicas con relación a otros métodos comúnmente utilizados para esos mismos fines es que estas inyecciones no requieren de grúas o equipos pesados para su ejecución pues solamente debe utilizarse una máquina de perforación y una bomba de pistón tal como la que se ilustra en la Fig. 15.

Por otra parte, también es posible construir columnas verticales de materiales granulares tales como columnas de arena o de mezclas de arena y piedra que permiten mejorar las propiedades de ingeniería en perfiles de suelos muy blandos. En este caso es necesario ir levantando el tubo a medida que progresa la inyección.



FIG.15 Bomba de pistón de 600 psi utilizada para inyectar materiales en bulbos de gran tamaño.

## 11. CONCLUSIONES

Se consiguieron experimentalmente los valores de viscosidad de un fluido que al ser inyectado en una masa de suelo arcilloso permiten la generación de fisuras en la masa de suelo producto de los procesos denominados-fracturamiento o “digitación” y para el almacenamiento del fluido por expansión de dichas fisuras en el suelo receptor. La mínima viscosidad para comenzar en el proceso de digitación en suelos a bajos esfuerzos de confinamiento en el laboratorio es de 10.000 cps. Para viscosidades por encima de este valor comienza el almacenamiento incipiente del fluido en el suelo a medida que aumenta la presión requerida para mantener el flujo.

Para digitación en suelos durante pruebas de campo de identificó que la viscosidad mínima requerida para iniciar tanto la digitación como el almacenamiento incipiente del fluido en el suelo dependen de la resistencia al corte no drenado del suelo receptor. El valor para iniciar la digitación para suelos blandos es del orden de los 20.000 cps.

Se demostró experimentalmente que el fluido inyectado se almacena en cavidades similares a bulbos elipsoidales de revolución. Todos los volúmenes inyectados fueron medidos y permitieron la verificación de las dimensiones de los depósitos logrados para el fluido inyectado. La demostración de la forma del depósito fue realizada mediante técnicas tomográficas y ensayos SPT. Para eso se tiñó el fluido con colorantes que permitieron su identificación respecto al suelo natural. Los depósitos definen bulbos elipsoidales cuyo volumen se ajusta muy bien con las dimensiones de los ejes medidos en sitio.

La posición de los ejes principales de dichos elipsoides puede ser controlada durante la inyección y se demostró experimentalmente que pueden rotar 90°. Es decir, el eje principal puede ser horizontal o vertical según se defina durante el proceso.

El tamaño del bulbo elipsoidal puede ser maximizado ajustando la viscosidad del fluido inyectado de acuerdo con la resistencia al corte del suelo receptor. Se estableció que al crecer, el bulbo puede producir la falla del suelo por encima del mismo hasta la superficie del terreno. Este efecto puede ser estudiado mediante el uso de las teorías de anclajes, lo cual permite a su vez estimar las presiones a las que ocurrirá la falla del suelo por encima del bulbo. La comparación de estas presiones calculadas con las medidas durante las inyecciones indica que las mismas son muy similares entre sí para fines prácticos.

Se determinó experimentalmente el umbral de viscosidad por encima del cual el bulbo puede crecer sin límite. Para lograr este crecimiento ilimitado del bulbo, la viscosidad debe ser tal que produzca más pérdidas al fluir por la superficie de falla generada al desprenderse el suelo por encima del bulbo que al desplazar lateralmente el suelo. Al realizar estos ajustes a la viscosidad se lograron bulbos elipsoidales de hasta tres veces los volúmenes logrados a viscosidades menores que dicho umbral. Los bulbos más grandes inyectados fueron de 35 m<sup>3</sup> y 50 m<sup>3</sup> pero se pueden lograr tamaños mayores dependiendo de la resistencia al corte del suelo y la profundidad de inyección.

Se estableció experimentalmente que dependiendo de la profundidad del bulbo y el volumen de fluido inyectado puede ocurrir el levantamiento de la superficie del terreno. A tal efecto se preparó una correlación que permite anticipar dicho levantamiento a fin de planificar adecuadamente el volumen y la profundidad del bulbo para minimizar estos efectos.

Las presiones de poros aumentan en el terreno circundante como producto de la expansión de la cavidad para almacenar el fluido inyectado. No obstante, debido a que el bulbo está conectado con la atmósfera, en el interior del mismo las presiones corresponden a las condiciones geostáticas. En consecuencia, el flujo debido a la disipación de las presiones de poros es desde el terreno circundante hacia el bulbo.

Las técnicas involucradas en el proceso de formación de bulbos de gran tamaño tienen una variada potencialidad de aplicaciones en la ingeniería que van desde disposición de materiales en zonas prístinas donde el transporte encarece las operaciones a la formación de estratos de buenas propiedades de ingeniería para fundar pilotes o construir columnas de materiales granulares en perfiles de suelos muy blandos.

## 12. REFERENCIAS

- [1] Echezuría, Heriberto; Vasquez; Pedro; De Aguiar, Jose; Urich, Juan F; *Disposal of fluids by displacement injection in shallow soils*, United States Patent No. 6,491,100; December 10, 2002
- [2] Das, Braja; *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*, Cuarta edición, International Thomson Editores, 2001, Chap.8, pp. 504-519.

