

COMPRESIBILIDAD DE ARENAS CEMENTADAS EN AMBIENTE SEMIÁRIDO ¹

Paola Bandini² y Rosa Imelda Olague Caballero³

Resumen: En este artículo se describen las características físicas y los resultados de pruebas de consolidación de una arena silícea cementada con carbonato de calcio, típica de los horizontes petrocálcicos propios de los ambientes áridos y semiáridos del Suroeste de los Estados Unidos. Para preservar la estructura y cementación del suelo se tomaron bloques de la arena cementada y se labraron especímenes inalterados para realizar pruebas de consolidación. Se encontró que la matriz de la arena cementada en su estado natural tiene densidad muy baja y es muy porosa. Cuando este material tiene contenidos de agua muy bajos, similares a las condiciones secas naturales del sitio, la estructura del suelo es estable y relativamente resistente a la carga normal. Sin embargo, los resultados de las pruebas de consolidación indican que la saturación pudiese causar el colapso de la matriz arenosa cementada y el asentamiento de este suelo.

Palabras clave: arena cementada, asentamiento, compresibilidad, consolidación, estructura del suelo.

COMPRESSIBILITY OF CEMENTED SANDS OF SEMIARID ENVIRONMENT

Abstract: This paper describes the physical characteristics and results of consolidation tests performed on a silica sand cemented with calcium carbonate, typical of the petrocalcic horizons found in the arid and semiarid regions of the southwestern United States. To preserve the structure and cementation, block samples of the cemented sand were excavated; undisturbed specimens were trimmed from these blocks for the consolidation tests. It was found that the fabric of the cemented sand in its natural state has low density and is very porous. When this material is at very low moisture contents, similar to the *in situ* dry conditions, the soil structure is stable and relatively strong under normal loading. However, the results of the consolidation tests showed that saturation could cause the collapse of the loose, cemented sand matrix and soil settlement.

Keywords: cemented sand, compressibility, consolidation, settlement, soil structure.

INTRODUCCIÓN

Las arenas naturalmente cementadas se caracterizan por tener una estructura granular con cementación derivada ya sea de la deposición secundaria de un mineral cementante o de la recristalización debida a presiones de confinamiento o temperaturas relativamente elevadas. La cementación natural imparte características a la estructura del suelo que son muy difícil o imposible de reproducir en el laboratorio. Este estudio se enfoca en las arenas naturalmente cementadas por la deposición secundaria de carbonato de calcio.

Los suelos arenosos cementados se encuentran en abundancia en regiones desérticas del suroeste de los Estados Unidos (Beckwith y Hansen, 1982), incluyendo Nuevo México y Arizona, y en áreas vecinas del norte de México. En estas regiones de clima árido o semiárido, se presentan horizontes petrocálcicos con diferentes niveles de desarrollo y gran variabilidad vertical y lateral. En muchos casos, el cemento está compuesto principalmente de carbonato de calcio u otro carbonato proveniente de la descomposición y erosión de rocas de la zona. El origen del carbonato de calcio que sirve de cemento en estos suelos ha sido tema de discusión; sin embargo, Gile y Grossman (1979) demostraron que el carbonato de calcio puede ser transportado y depositado en la superficie del terreno por la acción del viento.

¹ Artículo recibido el 6 de octubre de 2011 como parte del 2do. Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, New Mexico State University, Box 30001, MSC 3CE, Las Cruces, New Mexico, 88003-8001, USA. E-mail: paola@nmsu.edu

³ Instructora y Coordinadora de Programa, New Mexico State University. E-mail: rolague@nmsu.edu

La cementación carbonácea en estos suelos se desarrolló, y continúa desarrollándose en ciertos perfiles, progresivamente y como el resultado de numerosos ciclos alternados de lluvias breves y largos períodos de sequía en climas áridos o semiáridos. Durante la época de lluvias, el polvo de carbonato presente en la superficie del suelo fue arrastrado por el agua hacia dentro del suelo permeable. Sin embargo, las lluvias cortas y las altas temperaturas ambientales que caracterizan los ambientes desérticos provocan la evaporación rápida del agua de lluvia que percola en el suelo de tal manera que el agua solo alcanza a penetrar profundidades relativamente superficiales. La evaporación rápida del agua de lluvia en estos perfiles causó la deposición sucesiva del polvo de carbonato en cada ciclo de mojado y secado en el perfil (Gile y Grossman, 1979; Beckwith y Hansen, 1982).

El desarrollo de los perfiles petrocálcicos se inicia en los estratos superficiales a consecuencia de la deposición de carbonato de calcio al nivel de percolación del agua de lluvia. Gradualmente, el carbonato comienza a recubrir los granos de arena y a ocupar los vacíos de la matriz del suelo, propiciando la cementación o unión de los granos de arena. La acumulación continua del carbonato forma nódulos fuertemente cementados, llamados también concreciones, cuya forma, tamaño, resistencia y distribución espacial puede ser muy variada. Adicionalmente, la lluvia provoca la movilización vertical de los finos, que son arrastrados hacia los estratos inferiores. Este proceso, conocido como iluviación, genera el reemplazo gradual de los finos por el carbonato de calcio. Cuando el reemplazo es parcial, la estructura del suelo es muy porosa y se encuentra a densidades muy bajas.

Una vez que los vacíos de la matriz del suelo han sido parcialmente llenados de carbonato, la permeabilidad del suelo se reduce previniendo o dificultando que el proceso de percolación y arrastre del carbonato continúe en la dirección vertical. Como consecuencia, el agua que logra penetrar la parte superior del perfil busca caminos preferenciales de percolación en la dirección lateral. En este punto, el desarrollo vertical del perfil se detiene o se hace muy lento. En un perfil bien desarrollado la parte superior generalmente abarca 0.5 m a 1.5 m y se caracteriza por un horizonte muy cementado, prácticamente impermeable, con laminaciones y características de roca, llamado perfil petrocálcico o localmente Caliche. Inmediatamente debajo del horizonte petrocálcico, altamente endurecido por la cementación, se encuentra un suelo con varios grados de endurecimiento y nódulos. A este nivel se observa que el grado de cementación disminuye con la profundidad y que el cemento le da un color blancuzco al suelo, especialmente donde la concentración de nódulos y carbonato es mayor.

Existen muy pocos programas experimentales dedicados al estudio de las características y propiedades mecánicas de las arenas cementadas de clima desértico (por ej., Gile y Grossman, 1979; Beckwith y Hansen, 1982; Bandini y Olague-Caballero, 2008; Olague-Caballero, 2008). Sin embargo, el rápido desarrollo económico, urbano y vial de estas regiones en las últimas dos décadas justifica una mayor atención para este tipo de suelos cementados. La variabilidad y la típica fragilidad de la estructura de estos suelos cementados han dificultado y limitado su estudio y caracterización. Este artículo discute los resultados experimentales de pruebas de consolidación o edométricas y observaciones cualitativas de la estructura del suelo en muestras inalteradas de una arena cementada de desierto. De particular interés es la compresibilidad de la estructura bajo cargas estáticas y condiciones tanto de saturación como seca.

PROGRAMA EXPERIMENTAL Y MUESTREO

Sitio del muestreo

El muestreo se realizó en un corte longitudinal de carretera localizado al Este del Aeropuerto Internacional de Las Cruces, en el Sur del Estado de Nuevo México, Estados Unidos de América. El sitio tiene coordenadas de longitud Norte 32° 18.322' y latitud Oeste 106° 54.517' y está ubicado a 1355 m sobre el nivel del mar. La zona tiene clima desértico semiárido con una precipitación promedio anual de 206 mm. En este sitio el corte tiene una altura aproximada de 2.3 m en la parte central y expone un perfil petrocálcico típico de paleosuelo, compuesto por suelo arenoso de abanico aluvial que data del Pleistoceno Medio y pertenece a una superficie geomorfológica relativamente plana llamada "Upper La Mesa" (que significa La Mesa Superior) (véase la Figura 1a).

Los perfiles petrocálcicos de la formación Upper La Mesa presentan una variación vertical del grado de cementación que va desde un material completamente endurecido y calcificado muy cercano a la superficie, hasta un suelo medianamente cementado y nodular a una profundidad de 2.5 m. Debajo de la zona nodular, el suelo se caracteriza por una matriz arenosa ligeramente cementada de color marrón rojizo claro con abundantes manchas blancuzcas y decoloraciones debido al carbonato de calcio. Las muestras se tomaron a una profundidad de aproximadamente 1.4 m y 2.0 m por debajo de la superficie original del terreno. A esta profundidad, los nódulos varían mayormente entre 5 mm y 30 mm de diámetro (véase la Figura 1b). Bajo una presión aplicada por los dedos, la dureza de los nódulos varía de dura a ligeramente dura en condiciones naturales de contenido de agua muy bajo; los nódulos pueden ser fácilmente rotos con los dedos si se humedecen.



(a) (b)
Figura 1: Arena cementada de la formación Upper La Mesa: (a) perfil expuesto y (b) detalle de la apariencia nodular del suelo a la profundidad del muestreo.

Toma de muestras inalteradas

El estudio experimental de las arenas cementadas requiere que las muestras sean representativas de las condiciones naturales *in situ* del material y que las propiedades del cemento y la estructura del suelo sean preservadas durante la toma y preparación de las muestras. Para lograr estas condiciones, se tomaron muestras con la técnica del bloque sin usar caja. Varios bloques de 0.4 m a 0.6 m por cada lado se excavaron manualmente utilizando picos grandes y pequeños. Este suelo se presenta muy duro y rígido en su estado natural, caracterizado por un contenido de agua muy bajo; sin embargo, al iniciar la excavación se detecta que la estructura es relativamente frágil y quebradiza.

Una vez que un bloque estaba completamente separado del perfil, se envolvió con una capa doble de gasa o estopilla y se procedió a cubrirlo con parafina caliente. El procedimiento se repitió hasta formar una cubierta gruesa de gasa y parafina (Olague-Caballero, 2008). Aunque el suelo está compuesto por una matriz de arena, la cementación es suficiente para impartir resistencia a la muestra. Sin embargo, este tratamiento es necesario para preservar los bloques intactos durante su traslado y manejo y para dar confinamiento a las muestras durante el labrado de los especímenes en el laboratorio.

Ensayos de laboratorio

Se realizaron siete ensayos edométricos (ASTM 2435-03) en especímenes inalterados labrados de los bloques de suelo. Cinco especímenes se sumergieron en agua por 24 horas antes del comienzo de los ensayos y se mantuvieron sumergidos durante toda la carga. Un espécimen se cargó en el aparato de consolidación en condición seca (secado al aire). Otro espécimen se cargó seco (secado al aire) hasta 246 kPa y luego se sumergió por 24 horas manteniendo la misma carga; después de este tiempo la prueba se continuó manteniéndose el espécimen sumergido. Este último ensayo se realizó para observar el efecto del contenido de agua y saturación en la compresibilidad de la matriz cementada.

Muestras alteradas pero representativas del sitio fueron tomadas de mismo lugar donde se excavaron cada uno de los bloques. Así que para cada bloque se realizaron pruebas para determinar la densidad o peso unitario, límites líquido y plástico, distribución granulométrica, gravedad específica, pH y contenido de carbonato de calcio (CaCO_3). La microestructura del suelo, incluyendo la matriz arenosa, los nódulos y el cemento, se observó con un microscopio electrónico de barrido (MEB).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características generales

El peso unitario seco de este suelo es muy variable debido a la heterogeneidad típica de los perfiles petrocálcicos. Se encontró que el peso unitario seco varía entre 12 kN/m^3 y 15 kN/m^3 , con un promedio de 13.5 kN/m^3 , correspondiendo a un rango de relación de vacíos inicial de 1.16 a 0.73 respectivamente. Esto corrobora que la matriz arenosa cementada existe en un estado natural muy suelto. De una manera empírica se pudo observar que la permeabilidad de este suelo cementado

es muy alta. Al verter agua sobre la superficie de los bloques o en la superficie del corte, el agua desaparece muy rápidamente. Este suelo se clasificó como una arena pobremente graduada con limo (SP-SM) de acuerdo al Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (ASTM D 2487-00). El límite líquido varía entre 42% y 52%, y el índice de plasticidad varía entre 9% y 28%. Estos valores indican la presencia de arcilla en las muestras estudiadas.

La gravedad específica de los sólidos de la matriz arenosa cementada se encontró igual a 2.64, mientras que la gravedad específica de los nódulos se determinó como 2.67. El pH del suelo se midió en el laboratorio con un promedio de 8.4. Como era de esperarse, el porcentaje de CaCO_3 equivalente encontrado en la matriz arenosa fue menor que el encontrado en los nódulos. Por ejemplo, el porcentaje de CaCO_3 en una muestra de la matriz arenosa en un bloque de suelo fue 33.8%, mientras que los porcentajes de CaCO_3 en tres nódulos tomados del mismo bloque fueron 40.0%, 54.0% y 76.5%.

Microestructura del suelo

Con el fin de estudiar cualitativamente la estructura y tipo de cemento en esta arena se tomaron imágenes con un microscopio electrónico de barrido (MEB). La Figura 2a muestra la matriz granular cementada con abundantes acumulaciones de carbonato de calcio tanto en la superficie de los granos individuales de arena como en los puntos de contacto y poros. Nótese en la parte inferior derecha de la Figura 2a como la capa muy delgada de carbonato se despega parcialmente de la superficie de un grano de arena. Es evidente que este suelo es sumamente poroso y que la mayoría de los poros están interconectados permitiendo el flujo rápido de agua, resultando en una permeabilidad alta. La Figura 2b muestra en más detalle los pequeños cristales o partículas de carbonato que llenan los espacios porosos, se adhieren o cementan los granos de arena y forman pequeños grupos o racimos.

Muestras de la matriz del suelo se lavaron para eliminar todo el carbonato de calcio. Los granos de arena libre de material cementante y los granos de arena tomados directamente de la matriz arenosa se muestran en la Figure 3. Es interesante notar que los granos de arena en estas muestras son en su mayoría angulares y subangulares (véase la Figura 3a). El suelo original en el sitio de muestreo se formó en un abanico aluvial. En este tipo de depósito, los sedimentos no recorren grandes distancias desde la fuente del material hasta el sitio de deposición y, por tanto, los granos tienden a ser angulares.

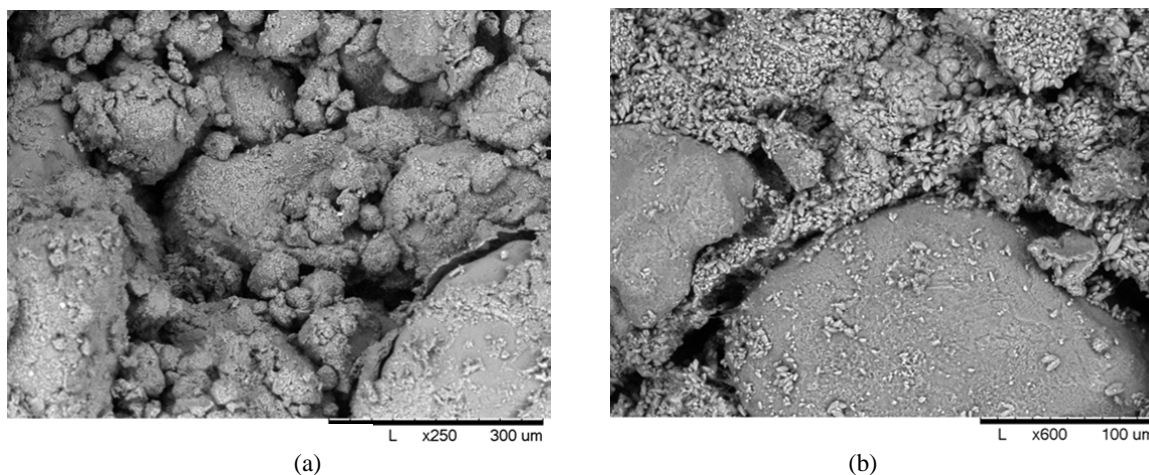


Figura 2: Imágenes de la estructura de la arena cementada tomadas con un MEB: a) matriz cementada porosa, y b) detalle de las partículas de cemento rodeando los granos de arena.

Pruebas de consolidación

Los resultados de las pruebas de consolidación se presentan en la Figure 4. Las curvas de compresión se identificaron con términos que describen la condición del espécimen durante la carga (seco, sumergido, seco/sumergido). La Tabla 1 muestra las relaciones de vacíos iniciales y finales y los contenidos de agua finales de los especímenes. Es de notar los valores elevados de la relación de vacíos inicial de estos especímenes (entre 0.787 y 1.011) no son valores típicos de arenas. Este suelo puede existir con densidades tan bajas gracias al cemento que mantiene unida la matriz granular. También se observó la marcada variabilidad del material en términos de densidad dentro de un mismo bloque de suelo y a la misma profundidad en el perfil.

Las curvas de compresión (carga), descarga y recarga para la condición sumergida muestran pendientes similares a pesar de que corresponden a especímenes con densidades diferentes. En los especímenes sumergidos se registraron compresiones importantes a pesar de la abundante cementación natural del suelo (véase la Figure 4). La estructura abierta y

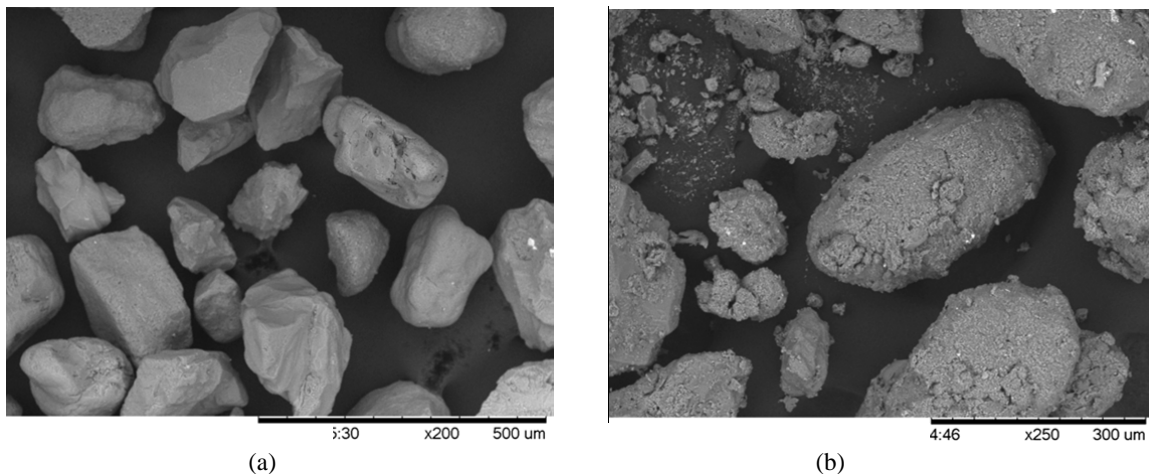


Figura 3: Granos de arena a) libres de material cementante y b) recubiertos del cemento natural.

porosa de la arena cementada se debilita con la saturación y tiende a colapsar cuando el esfuerzo normal alcanza un cierto límite. Se observó que tanto la matriz granular como los nódulos se ablandan considerablemente con el contenido de agua. Es posible romper estos últimos en condición húmeda o saturada sólo con ejercer una presión suave con los dedos.

El espécimen seco sufrió una compresión mucho menor a la de los especímenes sumergidos (véase la Figura 4). Su relación de vacíos inicial fue de 0.965 y la final de 0.870, lo que representa un cambio de la relación de vacíos de 0.095. Los especímenes que fueron sumergidos desde el inicio de la prueba edométrica sufrieron una disminución de la relación de vacíos entre 0.209 y 0.414 (24 horas después de la aplicación del último incremento de carga) (véase la Tabla 1). Otro espécimen se cargó inicialmente seco y, como era de esperarse, mostró una pendiente similar al otro espécimen seco en esta primera parte de la prueba. Una vez que fue sumergido se produjo la compresión de la matriz bajo una carga normal constante de 246 kPa (esta compresión corresponde al segmento vertical de la curva de compresión del espécimen Seco/Sumergido en la Figura 4); subsecuentemente la pendiente de la curva de compresión de este espécimen se igualó a la de los otros especímenes sumergidos. La disminución de la relación de vacíos asociada al colapso de la matriz del suelo durante la saturación bajo carga constante fue de 0.069.

En los especímenes sumergidos 1 al 4 se notó una compresión considerable a partir de una carga normal de 62.4 kPa. La pendiente de la curva de compresión del espécimen sumergido 5 comenzó a diferenciarse de los especímenes secos a partir de una carga normal de 123.7 kPa. Es probable que el espécimen 5 contuviera uno o más nódulos que lo hicieran un poco más denso y resistente a la compresión. Los especímenes sumergidos tuvieron una expansión similar durante la etapa de descarga (de 981 kPa a 31.8 kPa), con un aumento promedio de la relación de vacíos de 0.035.

El contenido de agua en la arena cementada pudiese causar la disolución del carbonato de calcio. Sin embargo, el pH de este suelo y del agua usada en el laboratorio no es suficientemente bajo para causar la disolución rápida de CaCO_3 . En cambio, se puede explicar el ablandamiento casi instantáneo de la matriz cementada por la pérdida súbita de succión cuando el suelo se satura. Este material existe en un ambiente árido y con contenidos de agua muy bajos. En estas condiciones, la succión matricial del suelo puede llegar a ser muy elevada y ser responsable por la dureza y rigidez de la matriz cementada y los nódulos.

Tabla 1: Relación de vacíos y contenido de agua de los especímenes.

Especímen No.	Condición de prueba	Relación de vacíos		Cambio de relación de vacíos	Contenido de agua final (%)
		Inicial	Final ^a		
1	Sumergido	1.011	0.672	0.339	27.7
2	Sumergido	0.941	0.637	0.304	31.5
3	Sumergido	0.924	0.590	0.334	30.0
4	Sumergido	0.960	0.546	0.414	27.0
5	Sumergido	0.787	0.578	0.209	26.8
6	Seco	0.965	0.870	0.095	2.4
7	Seco / Sumergido	0.834	0.552	(No aplica)	25.2

^a Relación de vacíos después de una carga normal de 981 kPa.

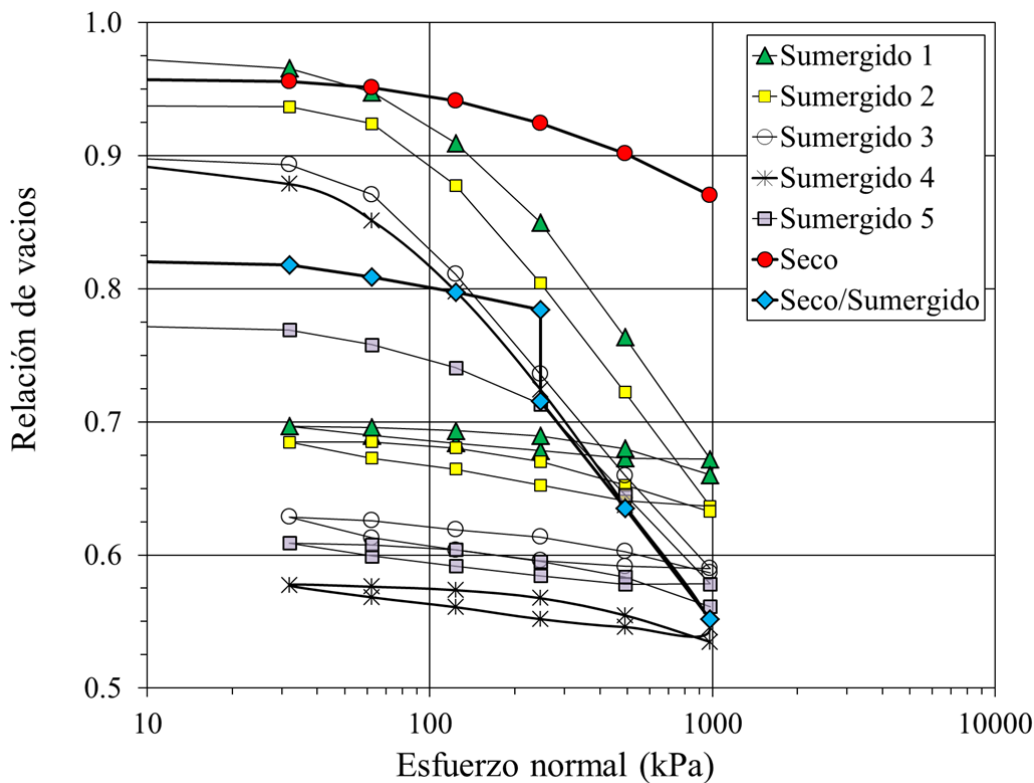


Figura 4: Resultados de las pruebas de consolidación.

CONCLUSIONES

Las arenas cementadas con carbonato de calcio u otro mineral son abundantes en regiones con climas áridos y semiáridos como los del Suroeste de los Estados Unidos. Se estudió una arena cementada perteneciente a un horizonte petrocálcico característico del Sur de Nuevo México. Se excavaron bloques de suelo de un perfil de carretera para obtener muestras inalteradas y preservar la cementación y la estructura del suelo durante las pruebas. Se labraron cuidadosamente especímenes inalterados de los bloques de suelo. Las imágenes de MEB mostraron que esta arena es muy suelta y porosa a pesar de la cementación; el peso unitario de las muestras (promedio de 13.5 kN/m^3) corroboró la condición suelta de la matriz del suelo y la marcada variabilidad de las propiedades y características de este tipo de suelo.

Las pruebas de consolidación confirmaron que este tipo de arena cementada puede ser susceptible al contenido de agua y la saturación del suelo. Las curvas de carga, descarga y recarga de las pruebas edométricas en especímenes sumergidos mostraron la tendencia típica de suelos no cementados. Los especímenes saturados tuvieron una disminución de la relación de vacíos entre 0.209 y 0.414 (durante la etapa de carga) y las curvas de compresión tuvieron pendientes muy similares. El resultado de la prueba edométrica en un espécimen seco mostró que el suelo cementado seco es mucho más rígido y menos compresible que el mismo suelo en condición saturada. Una vez que el contenido de agua aumenta o el suelo se satura, éste pierde rápidamente gran parte de la capacidad de carga y la estructura se ablanda considerablemente. La matriz cementada, muy porosa y de baja densidad, puede colapsar cuando se sujeta a esfuerzos verticales a medida que el contenido de agua aumenta. Se cree que cuando la arena cementada se humedece o se sumerge pierde la succión que la mantiene fuerte y rígida en condiciones de muy bajo contenido de agua.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen el apoyo invaluable brindado por William Kingsley en la selección del sitio y el procedimiento de muestreo. Su experiencia y conocimiento sobre las arenas cementadas y horizontes petrocálcicos del sur de Nuevo Mexico fue de gran beneficio para este estudio. También se agradece el apoyo de los siguientes estudiantes durante la toma de muestras de suelo: Hung V. Pham, Thanabalasingam Sathees, Selvarajah Ramesh y Kandeepan Saravanapavan.

REFERENCIAS

- Bandini, P. y Olague-Caballero, R. I. (2008). "Effect of moisture on the peak shear stress and compressibility of a carbonate cemented sand of southern New Mexico", en *ASCE Geotechnical Special Publication No. 179: Characterization, Monitoring, and Modeling of Geosystems*. Memorias del GeoCongress 2008, New Orleans, Louisiana, 9-12 de marzo, pp. 404-411.
- Beckwith, G. H. y Hansen, L. A. (1982). "Calcareous soils of the southwestern United States", en *Geotechnical Properties, Behavior, and Performance of Calcareous Soils, ASTM STP 777*, K. R. Demars y R.C. Chaney, Editores, American Society for Testing and Materials, pp. 16-35.
- Gile, H. y Grossman, R. (1979). *The Desert Project Soil Monograph*, Soil Conservation Service, U. S. Department of Agriculture.
- Olague-Caballero, R. I. (2008). *Oedometric and Shearing Response of Naturally Cemented Sands of Southern New Mexico*, Disertación doctoral, Departamento de Ingeniería Civil, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, USA.