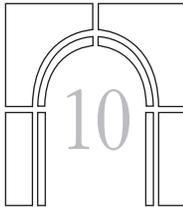

Cómo citar este artículo: Camacho-Tauta, J. F., Molina Gómez, F. A., Reyes Ortiz, O. J. (2014). Preparación de especímenes de arena para ensayos triaxiales mediante un método controlado de compactación. *Rev. Cient. Gen. José María Córdova*, 12(14). 185-196.



Preparación de especímenes de arena para ensayos triaxiales mediante un método controlado de compactación*

Recibido: 22 de agosto de 2014 • Aceptado: 28 de septiembre de 2014.

Preparation of Sand Specimens for Triaxial Testing by a Controlled Tamping Method

Préparation de spécimens pour la réalisation d'essais triaxiaux dans les sables avec contrôle de la méthode de compression

Preparação dos provetes no desenvolvimento de ensaios triaxiais em areia através de um método controlado de compactação

Javier Fernando Camacho-Tauta^a

Fausto Andrés Molina Gómez^b

Óscar Javier Reyes Ortiz^c

* Artículo resultado del proyecto de investigación ING-1187 "Caracterización mecánica y dinámica de suelos licuables", vinculado a la Facultad de Ingeniería, financiado por la Universidad Militar Nueva Granada.

^a Ingeniero civil. MSc. PhD. Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería, Investigador Grupo de Geotecnia. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. Comentarios a: javier.camacho@unimilitar.edu.co

^b Ingeniero civil. Joven Investigador Colciencias, Facultad de Ingeniería, Grupo de Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. Comentarios a: u1101029@unimilitar.edu.co

^c Ingeniero civil. MSc. PhD. Profesor titular, Facultad de Ingeniería. Investigador Grupo de Geotecnia. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. Comentarios a: oscar.reyes@unimilitar.edu.co

Resumen. Una de las dificultades más frecuentes en el desarrollo de ensayos triaxiales en arena se relaciona con el método de preparación de los especímenes y de la forma de alcanzar la densidad relativa esperada para las diferentes probetas que conforman un grupo de ensayos triaxiales. Diversos autores sugieren que el proceso de extracción y la reconstitución de muestras inciden de manera notable en los resultados obtenidos en los ensayos. Con el fin de proponer un método controlado de preparación de especímenes para ensayos triaxiales, se desarrolló un equipo que permite aplicar de forma controlada y uniforme la energía de compactación y la rápida verificación del proceso. El nuevo sistema se puso a prueba mediante la elaboración de un conjunto de especímenes para evaluar la repetitividad del proceso en la compactación de tres tipos de arena. Adicionalmente se llevó a cabo el mismo proceso utilizado únicamente con los dispositivos y accesorios originales del equipo triaxial para la elaboración de estas muestras. El estudio mostró que el nuevo sistema tiene mejor repetitividad para los tres materiales utilizados que el anterior equipo empleado para la compactación de especímenes.

Palabras clave: apisonamiento, densidad relativa, método controlado de compactación, reconstitución de muestras.

Abstract. One of most frequent difficulties in triaxial testing on sand is related to the method of preparation of the specimens as well as the achievement of the expected relative density for the samples of a group of triaxial test. Several authors suggest that the process of extraction and reconstitution of samples have a significant effect on the results of the triaxial test. In order to propose a controlled specimen preparation method for triaxial testing, it was developed a new equipment to apply controlled and uniform compaction energy and to provide a quick verification of the process. The new system was tested by developing a set of specimens to evaluate the repeatability of the compaction process in three types of sand. In addition, it was carried out the same process by using only the original devices of triaxial equipment for preparing these samples. The study showed that the new system has better repeatability for the three materials studied than the preview equipment.

Keywords: compaction system, tamping, reconstitution of samples, relative density.

Résumé. Une des difficultés les plus fréquentes pour la réalisation d'essais triaxiaux dans les sables se rapporte à la méthode de préparation des spécimens et à la manière d'atteindre la densité relative espérée pour différents types d'échantillonnage selon les résultats d'une série d'essais triaxiaux. Plusieurs auteurs suggèrent que le processus d'extraction et de reconstitution des échantillons affecte de façon significative les résultats obtenus dans les essais. Afin de proposer une méthode contrôlée de préparation de spécimens pour la réalisation d'essais triaxiaux, on a développé un équipement qui permet d'appliquer de forme contrôlée et uniforme l'énergie de compactage et la vérification rapide du processus. Le nouveau système a été testé pour les spécimens entiers, et ainsi évaluer la reproductibilité du processus dans le compactage de trois types de sables. En plus, on a effectué le même processus utilisé seulement avec les appareils et les accessoires originaux de l'équipement triaxial pour la préparation de ces spécimens. L'étude a montré que le nouveau système présente une meilleure répétabilité pour les trois matériaux que le précédent équipement utilisé pour compacter le sable.

Mots-clés: compression, densité relative, reconstitution des échantillons, système de compactage.

Resumo. Uma das dificuldades mais frequentes no desenvolvimento de ensaios triaxiais em areia, está relacionada com o método de preparação dos provetes e da forma de obter a densidade relativa esperada para as várias amostras que conformam um grupo de ensaios triaxiais. Muitos autores sugerem que o processo de extração e a reconstituição de amostras, tem influencia significativa nos resultados obtidos nos ensaios. Para propor um método de preparação controlada de espécimes para ensaios triaxiais, foi desenvolvido um equipamento que permite a aplicação de energia controlada, uniforme e de fácil verificação durante o processo de reconstituição. O novo sistema foi testado através do desenvolvimento de um conjunto de

amostras para avaliar a reprodutibilidade do processo na compactação de três tipos de areia. Além disso, foi realizado o mesmo processo usando os dispositivos e acessórios originais do equipamento triaxial. O estudo mostrou que o novo sistema apresenta uma melhor repetibilidade para os três materiais do que o equipamento original.

Palavras-chave: calcamento, desidade relativa, reconstituição de amostras, sistema de compactação.

Introducción

Debido al proceso de extracción de muestras de suelo, se han observado cambios en la estructura del material, los cuales evitan una adecuada conservación de sus propiedades en condición inalterada (Ladd, 1978). Este hecho es un inconveniente en la obtención de probetas aptas para la ejecución de ensayos de laboratorio con muestras de material fino granular, como lo son la columna resonante, el triaxial estático o el triaxial cíclico. Por esa razón, es necesaria la implementación de técnicas de reconstitución de muestras, que se basan en procesos de compactación (Frost y Park, 2003); la mayoría de estos se efectúan controlando la densidad relativa del material.

En muchos laboratorios de mecánica de suelos, la preparación de muestras destinadas para la ejecución de alguno de los ensayos mencionados se realiza mediante técnicas no estandarizadas, en las que no se controlan de forma adecuada los parámetros que contribuyen a la consecución de las condiciones deseadas en el suelo al momento de ejecutar el ensayo. Por esto surge la necesidad de la implementación de un sistema de reconstitución de muestras que facilite el control de los parámetros de compactación y que permita desarrollar ensayos sin que se afecten los resultados a causa del método de preparación del espécimen, es decir, que se pueda garantizar reproducibilidad.

En este documento se presentan los resultados obtenidos por medio de un sistema de compactación de muestras de arena, desarrollado en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Militar Nueva Granada. Este sistema fue probado en tres distintos tipos de suelo, con el fin de controlar la densidad relativa de cada uno.

Densidad relativa o compacidad relativa

En suelos granulares, la acomodación de las partículas de suelo influye notablemente en el peso unitario de este. Dicha acomodación se expresa por medio de la densidad relativa (D_r), la cual depende de valores extremos de relación de vacíos o de peso unitario seco. La densidad relativa es un índice que cuantifica la compactación de un material granular entre su estado más denso y su estado más suelto posible (Budhu, 2011). Esta se puede representar mediante las ecuaciones 1 y 2.

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \quad (1)$$

$$D_r = \frac{\gamma_{dm\acute{a}x}}{\gamma_d} \left(\frac{\gamma_d - \gamma_{dm\acute{i}n}}{\gamma_{dm\acute{a}x} - \gamma_{dm\acute{i}n}} \right) \quad (2)$$

Los valores de relación de vacíos y de densidad seca se determinan mediante resultados experimentales, es decir, con la ejecución de los ensayos de laboratorio establecidos en las normas correspondientes.

Compactación de suelos

La compactación del suelo es la reducción de la relación de vacíos a través de la expulsión de aire por medio de la aplicación de energía mecánica, lo que permite que este se densifique y experimente un incremento en su resistencia (Budhu, 2011). La compactación en campo se logra mediante el uso de rodillos, vibrocompactadores, aplanadoras neumáticas, etc.; mientras que en el laboratorio se emplean técnicas basadas en el uso de martillos o apisonadores. La compactación del suelo es fundamental en el diseño de estructuras de pavimentos, en la determinación del potencial de licuación, en el cálculo de los parámetros elásticos y en la estimación de la resistencia al corte. Generalmente en el laboratorio se emplea el método Proctor para determinar los parámetros de compactación y luego se aplican los respectivos factores de conversión que permitan llevar los parámetros obtenidos con dicha prueba a campo.

Proctor

En la prueba Proctor, el suelo es compactado por capas en un molde con un martillo a una altura aproximada de 1 ft. Esta prueba tiene como objetivo determinar la densidad seca máxima bajo un contenido de humedad óptimo. El ensayo se realiza aplicando el material en varias capas. Luego sobre este se distribuye una cantidad de golpes sobre el área de la muestra, el cual se repite varias veces cambiando el contenido de agua las veces que sean necesarias. Siguiendo la metodología planteada por la American Society for Testing and Materials (ASTM, 2002a), en la actualidad se ejecutan dos pruebas asociadas a este método, las cuales denominan se *Proctor estándar* y *Proctor*



Figura 1. Elementos del sistema de compactación Proctor

Fuente: elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Mecánica de Suelos (UMNG)

modificado. Estas se establecen mediante las normas ASTM D-698 y D-1557 (ASTM, 2002a y b); según la American Society for Testing Materials, cada una se diferencia de la otra por el molde y el martillo empleado.

La energía de compactación es constante en cada método y depende de factores como el número de capas, la masa y la altura de caída del martillo o pistón, la cantidad de golpes y el volumen de la muestra (INVÍAS, 2007a). Estos factores se relacionan mediante la ecuación 3, la cual permite estimar la energía de compactación durante el ensayo.

$$E = \frac{n N P H}{V} \quad (3)$$

Por medio de la ecuación 3 es posible llevar a cabo la compactación de material granular en campo.

Reconstitución de muestras de arena en el laboratorio

Durante la ejecución de ensayos de laboratorio en algunos casos es ineludible la reconstitución de muestras. Esto es más notable en muestras de arena, las cuales debido al proceso de extracción no conservan las propiedades *in situ* y experimentan cambios en algunas de sus propiedades físicas, dentro de las que sobresale la densidad relativa. Por esa razón, es necesario simular las condiciones de terreno en el laboratorio durante la ejecución de ensayos, ya que si estos se realizan bajo condiciones distintas a las que el suelo experimenta en campo, no es posible obtener resultados confiables que contribuyan a la descripción del comportamiento físico mecánico del material (Mitchell y Soga, 2005). Para solucionar este inconveniente se emplean las técnicas de reconstitución que se mencionan a continuación.

Pluviación

El método de pluviación es uno de los más empleados en la reconstitución de muestras de laboratorio, puesto que este simula la deposición natural de suelos en la reconstitución de muestras. Sin embargo, durante el proceso de reconstitución no se garantiza la distribución uniforme del material dentro del molde de compactación, lo que afecta la densidad relativa y la resistencia del suelo en el que se va a ensayar (Polito, 1999). La técnica de preparación consiste en la aplicación del material por medio de un embudo delgado dentro del molde de compactación, dejando caer las partículas de la misma forma en que lo hace el agua durante la lluvia. Este método es aplicable para suelo seco y para suelo húmedo.

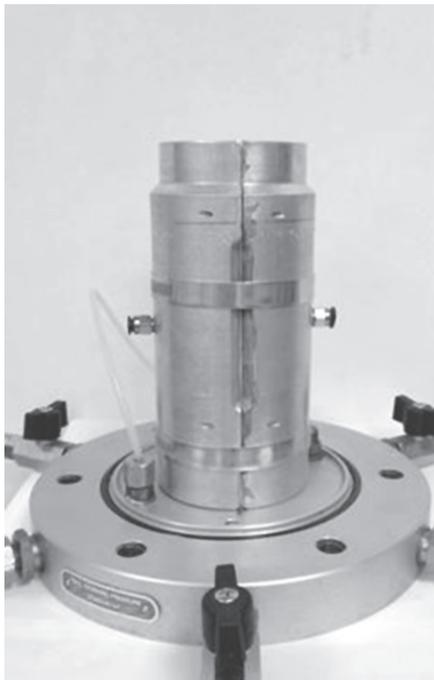
Apisonamiento

El apisonamiento es la técnica más empleada en la reconstitución de muestras para ensayos de laboratorio que incluyen confinamiento en cámaras triaxiales. Esta no simula los procesos de sedimentación natural del suelo, pero garantiza una mejor distribución de partículas y por con-

siguiente el grado de compactación que se desea obtener, gracias al control que se ejerce sobre la densidad del material (Polito, 1999). El método consiste en la aplicación de material dentro del molde de compactación distribuido en cierto número de capas. Una vez depositado el material se procede a compactar aplicando energía potencial por medio de un apisonador y controlando tanto la altura de caída como la altura final de cada capa. Sin embargo, el apisonamiento presenta algunos errores, ya que no permite controlar la altura de caída del apisonador. Este método se puede trabajar con material húmedo, incluyendo humedad cero.

Equipos

Para la preparación de especímenes de arena destinados para ensayos de confinamiento triaxial, se utilizaron los dispositivos con los que cuentan los equipos triaxiales junto con el apisonador empleado para el ensayo de granulometría por hidrómetro (INVÍAS, 2007b) y un calibrador para la verificación del proceso de compactación. Adicional a estos elementos, se empleó un sistema de reconstitución de muestras, el cual permite controlar la energía de compactación en la preparación de especímenes de arena. Los dispositivos para la preparación de muestras se exponen en la figura 2.



(a)



(b)

Figura 2. Sistema de reconstitución (a) antiguo; (b) nuevo
Fuente: elaboración propia a partir de la investigación

El sistema de compactación de muestras de arena es un sistema que permite la compactación de muestras de arena de 70 mm de diámetro y 140 mm de altura; este sistema cuenta con los siguientes elementos:

- Collar de extensión
- Anillo que soporta el collar de extensión y evita daños en la membrana de la látex que contiene el material granular
- Apisonador con diámetro de 68 mm y 606 g de masa, el cual cuenta con medición incorporada para el control de la altura de caída de este.

Estos elementos se muestran a continuación en la figura 3.



Figura 3. Elementos del sistema de compactación
Fuente: elaboración propia a partir de la investigación

Estos elementos son adaptaciones desarrolladas en vista de algunas dificultades observadas durante la compactación de muestras con la técnica del apisonamiento, dentro de las que se destacan:

- Distribución de los golpes de compactación
- Control de la energía de compactación o altura de caída
- Pérdida o desperdicio de material durante el proceso de compactación
- Comprobación de la densidad relativa en cada capa de compactación.

Mediante el sistema se busca obtener muestras que permitan la ejecución de ensayos de calidad y que simulen de forma eficaz las condiciones de campo, es decir, que los resultados de los parámetros mecánicos no se vean afectados por el proceso de reconstitución de muestras.

Materiales

En el desarrollo de la investigación se utilizaron tres tipos de arena, dentro de las cuales están: arena de Ottawa, arena del Río Guamo y Arena del Río Guayuriba. Estas arenas fueron seleccionadas debido a que cada una tiene características de granulometría, mineralogía y origen diferentes entre sí.

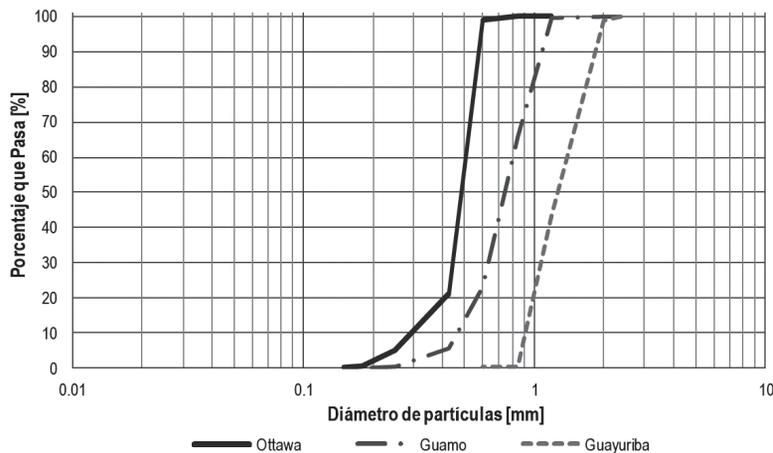


Figura 4. Curvas de gradación para cada tipo de arena
Fuente: elaboración propia a partir de la investigación

Metodología

Para la implementación del sistema, se fabricaron muestras con un grado de compacidad o densidad relativa del 80 %, por medio de las dos técnicas utilizadas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Militar Nueva Granada y empujando tres diferentes tipos de arena (Arena de Ottawa, Arena del Río Guamo y Arena del Río Guayuriba), con una humedad del 0 % y bajo una distribución de cinco capas, buscando la energía de compactación ideal para cada probeta y variando el número de golpes y la altura de caída del apisonador. Para cada uno de estos materiales, se realizó la clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (sucs) y se le efectuaron los siguientes ensayos de caracterización física:

- Granulometría por tamizado, norma INV-E 123 (INVÍAS, 2007a)
- Gravedad específica, norma INV-E 128 (INVÍAS, 2007d)
- Peso unitario seco máximo
- Peso unitario seco mínimo.

A partir de los resultados obtenidos se determinó la relación de vacíos máxima y la de vacíos mínima para cada tipo de material. Posteriormente, se procedió a preparar para cada tipo de

arena cinco muestras con los elementos que originalmente cuentan los equipos de confinamiento triaxial. Luego se compactó la misma cantidad de especímenes para cada uno de los materiales con el nuevo sistema de compactación; de esta manera se buscó comprobar la variación que tienen los parámetros de compactación, durante la reconstitución de especímenes de arena por medio de cada método siguiendo el siguiente programa experimental.

Tabla 1. Programa de reconstitución de muestras

Arena	Dr [%]	Cantidad
Guamo	80	5
Ottawa	80	5
Guayuriba	80	5

Fuente: elaboración propia

Para la reconstitución de muestras según esta metodología se debe establecer la energía de compactación necesaria para alcanzar la condición de compacidad deseada, y luego se sigue el mismo procedimiento mencionado en la técnica del apisonamiento.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos mediante la caracterización física señalan que cada material posee una distribución granulométrica casi paralela que permite clasificar cada material según su tamaño de mayor a menor diámetro de partícula, tal como se muestra en la figura 4. Además se comprobó que cada tipo de arena posee propiedades de mineralogía, composición y relaciones peso-volumen diferentes entre sí. Esto permite establecer si el nuevo sistema de reconstitución de muestras se puede implementar para varios tipos de suelo de tipo fino granular. Estas propiedades se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de caracterización física para cada tipo de arena

Parámetro	Guamo	Ottawa	Guayuriba
Gs	2,70	2,67	2,68
$e_{m\acute{a}x}$	0,95	0,79	1,18
$e_{m\acute{i}n}$	0,77	0,49	0,82
$gd_{m\acute{a}x}$ [g/cm ³]	1,52	1,79	1,47
$gd_{m\acute{i}n}$ [g/cm ³]	1,39	1,49	1,23
SUCS	SP	SP	SP

Fuente: elaboración propia

Durante el proceso de reconstitución de muestras con cada técnica se observó que solo para la arena de Ottawa fue posible alcanzar densidades relativas bajas con cualquiera de los dos métodos, ya que con solo la energía caída del material se obtuvo el grado de compactación deseado. Por eso no fue necesario el uso de cualquiera de los dos métodos de reconstitución para los otros dos tipos de material; mientras que para densidades relativas altas los sistemas funcionaron acorde a lo esperado en las tres arenas, con lo que se obtuvo la combinación entre el número de golpes y la altura de caída del apisonador necesarios para alcanzar la densidad relativa prevista. Los valores número de golpes y altura de caída del apisonador se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Energía de compactación para alcanzar la densidad relativa en cada material

Arena	Ottawa	Guamo	Guayuriba
Número de capas	5	5	5
Número de golpes por capa	3	1	1
Altura de caída [cm]	5	2	5
Energía compactación [g cm/cm ³]	84,50	11,27	28,17

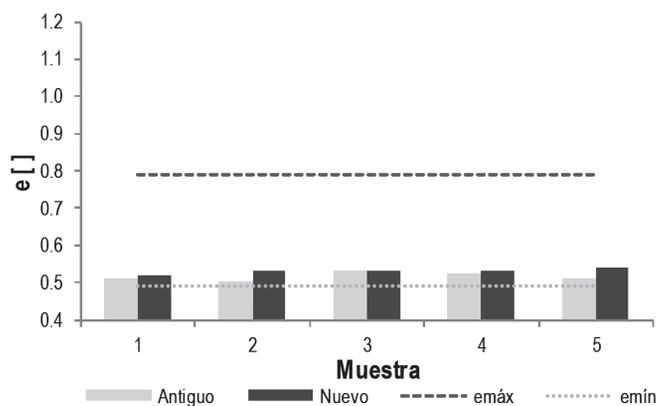
Fuente: elaboración propia

Al finalizar el proceso de compactación de cada muestra, se procedió a calcular la relación de vacíos obtenida con cada uno de los métodos. En la figura 4 se muestran las relaciones de vacíos obtenidas para cada arena con el sistema de reconstitución previo, mientras que en la figura 5 se exponen las relaciones de vacíos obtenidas para cada arena con el nuevo sistema de reconstitución. Adicional a eso, se evaluó el error promedio y la desviación estándar de la compactación de muestras bajo una determinada densidad relativa, la cual se relaciona en la tabla 4.

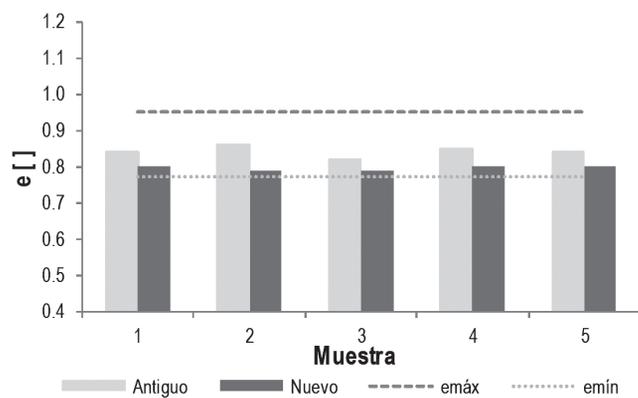
Tabla 4. Comparación de los sistemas de reconstitución de muestras mediante valores estadísticos

Parámetro	Sistema anterior			Nuevo sistema			
	Arena	Ottawa	Guamo	Guayuriba	Ottawa	Guamo	Guayuriba
D_r [%]		80	80	80	80	80	80
e_{promedio} []		0,51	0,84	0,84	0,53	0,80	0,85
Error promedio [%]		7	5	5	4	2	4
Desviación estándar		0,012	0,008	0,014	0,008	0,005	0,002

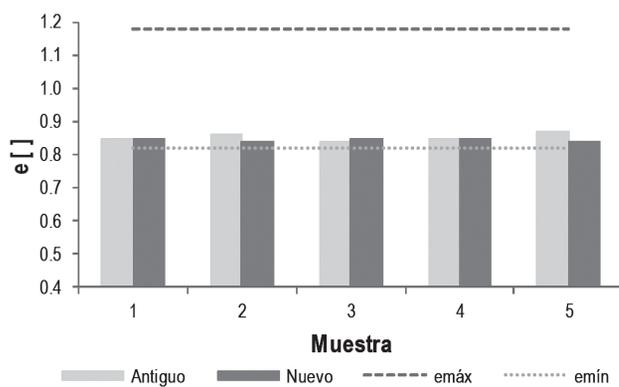
Fuente: elaboración propia a partir de la investigación



(a)



(b)



(c)

Figura 5. Comparación entre la relación de vacíos obtenidos con los dos sistemas de compactación: (a) arena de Ottawa; (b) arena del Río Guamo y (c) arena del Río Guayuriba
Fuente: elaboración propia a partir de la investigación

Conclusiones

Se logró implementar el sistema de reconstitución de arenas en el Laboratorio de Mecánica de suelos de la Universidad Militar Nueva con tres tipos de arenas: Ottawa, Guamo y Guayuriba, bajo distintos grados de compacidad relativa.

Durante la compactación de muestras se observó que para los materiales de tamaño medio y superiores no fue posible obtener densidades relativas bajas con el sistema de compactación, debido a que por efectos de gravedad y fricción interna del material se produjo una acomodación de partículas al momento de verter la arena dentro del molde de armado.

Se comprobó que por medio del nuevo sistema de reconstitución de muestras de arena es posible compactar muestras de arena controlando energía de compactación alzando una densidad relativa muy cercana a la esperada, es decir, con porcentajes de error bajos en comparación con el anterior sistema. Sin embargo, para densidades relativas bajas el error es mayor que para densidades relativas altas por efecto de la acomodación de partículas.

Al comparar los resultados obtenidos al calcular la relación de vacíos al finalizar el proceso de compactación, se observa que el nuevo sistema de compactación genera muestras más uniformes y con menor dispersión que con el anterior sistema de reconstitución utilizado en la preparación de probetas de arena, como lo señalan las gráficas de la figura 5.

Bibliografía

1. ASTM International (2002a). Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) (D 698). *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken.
2. ASTM International (2002b). Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56 000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)) (D 1557). *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken.
3. Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations*. New Delhi: Wiley John Wiley & Sons.
4. Frost, J. y Park J. Y. (2003). A Critical Assessment of the Moist Tamping Technique. *Geotechnical Testing Journal*, 26(1), 57-70.
5. INVÍAS (2007a). Análisis granulométrico de suelos por tamizado (INV E-123).
6. INVÍAS (2007b). Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos. Ensayo de compactación (INV E-141).
7. INVÍAS (2007b). Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (INV E-124).
8. INVÍAS (2007c). Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral (INV E-128).
9. INVÍAS (2007d). Relaciones de humedad-masa unitaria seca en los suelos. Ensayo modificado de compactación (INV E-142).
10. Ladd, R. S., 1978. Preparing Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 16-23.
11. Mitchell, J. K. y Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons.
12. Polito, C. P. (1999). *The Effects of Non-Plastic and Plastic Fines on the Liquefaction of Sandy Soils*. (tesis doctoral). Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 288.