

Métodos de reconstitución para la caracterización mecánica de suelos de grano grueso en ensayos triaxiales

A. J. Aparicio-Ortubé^a y Litzzy E. Barrientos-Arancibia^b

a Estudiante de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, ANT 050034, Colombia. E-mail: aaparicioo@unal.edu.co

b Estudiante de Maestría, Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Centro de Estudios de Posgrado e Investigación, Sucre, Bolivia. E-mail: lichita.elenita1583@gmail.com

RESUMEN

En este artículo se presentan y describen métodos de reconstitución empleados para la caracterización mecánica de suelos de grano grueso en ensayos triaxiales. Los métodos incluyen apisonamiento, deposición, sedimentación y pluviación bajo diferentes condiciones de saturación y procedimiento. Además, técnicas de densificación para cada método presentado son descritas. Un análisis crítico es llevado a cabo para identificar las ventajas y desventajas de los métodos de reconstitución.

Palabras clave: métodos de reconstitución, técnicas de densificación, suelos de grano grueso, ensayo triaxial.

ABSTRACT

Reconstitution methods employed for the mechanical characterization of coarse-grained soils in triaxial testing are presented and described in this paper. The methods include tamping, deposition, sedimentation, and pluviation under different conditions of saturation and procedure. Besides, densification techniques for each presented method are described. A critical analysis is conducted to identify the advantages and disadvantages of the reconstitution methods.

Key words: reconstitutions methods, densification techniques, coarse-grained soils, triaxial testing.

INTRODUCCIÓN

La caracterización mecánica de suelos de grano grueso (e.g., arenas) en términos de compresibilidad, rigidez y resistencia es esencial en aplicaciones ingenieriles geotécnicas para un diseño exitoso. A diferencia de los suelos de grano-fino (e.g., arcillas), la extracción de muestras de arena de alta calidad del terreno representa una labor compleja, es costosa y demanda mayor tiempo de ejecución, particularmente para suelos donde el enlace entre partículas está ausente o ligeramente desarrollado. Por este motivo, los métodos de reconstitución surgen como una alternativa para estudiar en laboratorio los efectos de variables relacionadas con el estado y naturaleza física de suelos de grano grueso, como ser la distribución del tamaño de partículas, forma de las partículas, composición mineral, contenido de finos, estado de esfuerzos, densidad relativa y acomodo y dirección de las partículas dentro de la masa de suelo.

En la actualidad existen varios métodos para reconstituir especímenes de suelo de grano grueso y ser ensayados bajo condiciones triaxiales. Generalmente, consisten en depositar material de suelo representativo de las condiciones *in situ* en un molde por medio de embudos, matraces o pluviadores bajo condiciones secas, húmedas o sumergidas. Para obtener relaciones de vacíos o densidades relativas objetivo se emplean técnicas de densificación, las cuales típicamente involucran apisonamiento, vibración o impacto. En este artículo se presentan y describen métodos de reconstitución empleados para la caracterización mecánica de suelos de grano grueso en ensayos triaxiales, los cuales incluyen apisonamiento, deposición, sedimentación y pluviación bajo diferentes condiciones de saturación y procedimiento. Además, técnicas de densificación son también descritas. Un análisis crítico es también realizado con el propósito de identificar las ventajas y desventajas de los métodos presentados.

MÉTODOS DE RECONSTITUCIÓN DE ESPÉCIMENES DE SUELO DE GRANO GRUESO

Apisonamiento

En este método, el proceso de reconstitución puede realizarse de dos formas. La Figura 1 ilustra el método de reconstitución mediante apisonamiento bajo condiciones húmedas y secas. Para condiciones húmedas, material de suelo arenoso secado al aire es primeramente mezclado con agua destilada de forma tal que el grado inicial de saturación del material compactado esté en un rango entre el 20% y 70%. El material de suelo es vertido en un molde acoplado al pedestal del triaxial y apisonado en capas de igual altura. El número de capas y cantidad de suelo por capa posibilita obtener una relación de vacíos o densidad relativa objetivo. Con este procedimiento se

obtienen especímenes de suelo con una respuesta esfuerzo-deformación relativamente uniforme y menor tendencia a la segregación de partículas. Además, puede ser utilizado para compactar varios tipos de suelos de grano grueso con una densidad relativa desde muy suelto a muy denso (Ladd, 1978).

El proceso de reconstitución de un espécimen de suelo bajo condiciones secas es similar al anterior, pero en este caso no se humedece el material. A pesar de que la reconstitución es ligeramente más rápida bajo condiciones secas, la obtención de especímenes con una densidad relativa muy suelta es una labor más complicada. Esto debido a la ausencia de succión matriz.

Dado que el método de reconstitución mediante apisonamiento involucra la conformación de capas, planos predefinidos son insertados en el espécimen de suelo, lo cual puede afectar su respuesta mecánica.

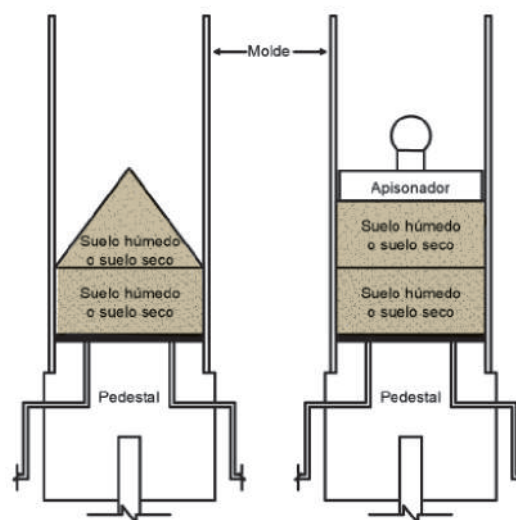


Figura 1. Método de reconstitución mediante apisonamiento.

Deposición

El método de reconstitución por medio de deposición de mezcla suelo-agua fue originalmente propuesto por Kuerbis & Vaid (1988) y posteriormente modificado por Carraro & Prezzi (2008). La Figura 2 ilustra el método de reconstitución mediante deposición de mezcla suelo-agua. En este método, material arenoso seco es vertido primeramente en un contenedor cerrado transparente. Si el espécimen de suelo va ser ensayado con una cantidad de finos determinada, este material también debe ser incorporado dentro del contenedor. El contenedor cerrado es vigorosamente agitado hasta que se observe homogeneidad en la mezcla seca. Luego, la mezcla seca es depositada en un tubo cilíndrico de

plexiglás con agua de-aireada hasta la mitad por medio de un embudo. Una vez depositado el material, el tubo es agitado hasta obtenerse una mezcla homogénea, girando de arriba hacia abajo. El tubo es colocado en el molde acoplado a la base del triaxial con la abertura de salida hacia abajo. Se vierte agua de-aireada en el molde y después de que la mezcla suelo-agua haya asentado, el tubo es retirado lentamente. A través de este método se pueden obtener especímenes homogéneos de arenas con una cantidad de finos determinada, elevados grados de saturación iniciales y respuestas mecánicas representativas de depósitos naturales de suelo formados bajo el agua. Una desventaja es la complejidad de obtener especímenes de suelo con una densidad relativa muy suelta (Murthy et al., 2007).

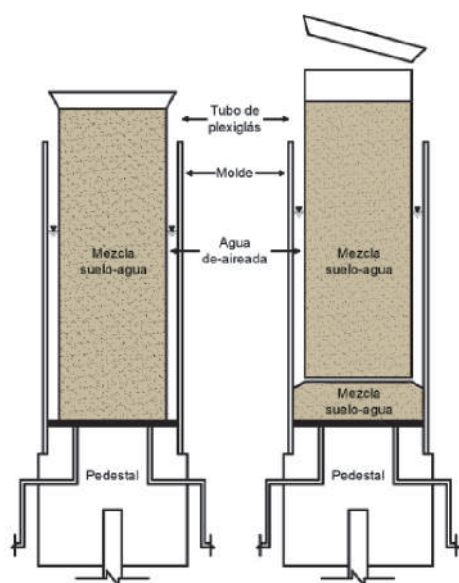


Figura 2. Método de reconstitución mediante deposición de mezcla suelo-agua.

La reconstitución de especímenes arenosos mediante deposición puede realizarse también empleando un embudo. La Figura 3 ilustra el método de reconstitución mediante deposición con embudo bajo condiciones secas y húmedas. Para condiciones secas, se posiciona inicialmente un embudo en la base del molde acoplado al pedestal del triaxial. Se deposita material arenoso dentro del embudo y se lo levanta a una velocidad constante de tal forma que la altura de caída de las partículas sea cero hasta llenar el molde (Ishihara, 1993; Lade & Yamamuro, 1997; Yamamuro & Wood, 2004; Zlatović & Ishihara, 1997).

El procedimiento de reconstitución en condiciones húmedas es similar al anterior, con la salvedad de que en este caso el material debe ser previamente humedecido. En condiciones húmedas es posible obtener especímenes de suelo con una densidad relativa más suelta.

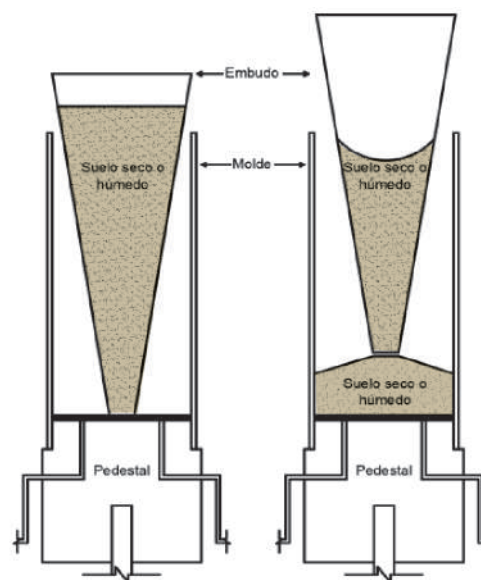


Figura 3. Método de reconstitución mediante deposición con embudo.

El método de reconstitución mediante deposición con embudo es considerado el más sencillo de realizar. Además, se puede obtener un amplio rango de densidades (Kwan & Mohtar, 2020). Sin embargo, la desventaja de emplear un embudo durante la deposición es que puede llegarse a formar un acomodo de partículas con orientaciones predefinidas dentro de la masa suelo, lo cual puede influir en la respuesta mecánica (Cresswell et al., 1999). Una variación a este método de reconstitución consiste en acoplar un tubo "rígido" en la abertura de salida del embudo (e.g., Monkul & Yamamuro, 2010), como se observa en la Figura 4.

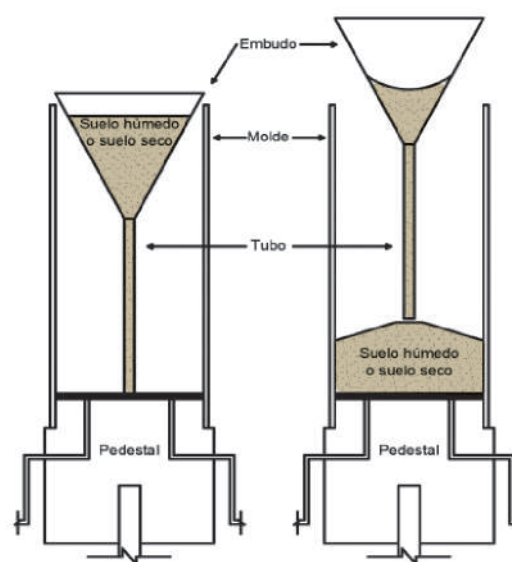


Figura 4. Variante del método de reconstitución mediante deposición con embudo - Tubo acoplado.

El proceso de densificación para los métodos de reconstitución por deposición puede lograrse mediante vibración del pedestal del triaxial o por medio de leves impactos en lados opuestos del molde con un mango de goma. Otra alternativa consiste en calibrar la abertura de salida del embudo o tubo de modo que la velocidad de deposición acomode las partículas a una densidad deseada.

Sedimentación

La reconstitución de especímenes de suelo arenoso por medio de sedimentación puede realizarse de dos formas. La Figura 5 ilustra el método de reconstitución mediante sedimentación bajo condiciones secas y la Figura 6 bajo condiciones pre-saturadas. En este método, el molde acoplado al pedestal del triaxial es parcialmente llenado con agua de-aireada. En condiciones secas, el material arenoso es vertido lentamente en el agua por medio de un embudo de forma tal que la distancia entre la abertura de salida del embudo y el nivel del agua sea mínima (Vaid et al., 1999; Zlatović & Ishihara, 1997).

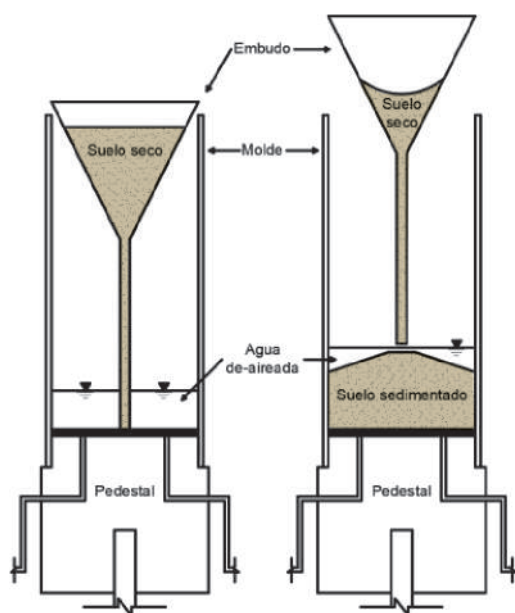


Figura 5. Método de reconstitución mediante sedimentación bajo condiciones secas.

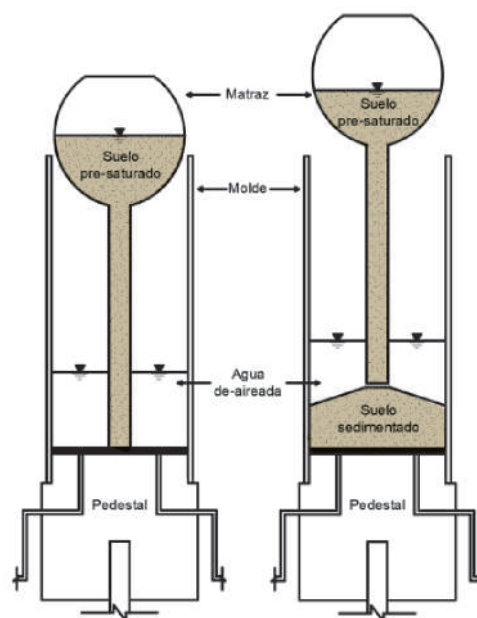


Figura 6. Método de reconstitución mediante sedimentación bajo condiciones presaturadas.

Bajo condiciones presaturadas, material arenoso mezclado con agua en un matraz es sometido a un proceso de saturación, el cual puede realizarse mediante la aplicación de calor o vacío. Una vez saturado el material, el matraz es colocado de forma invertida en la base del molde acoplado al triaxial y suspendido verticalmente de forma tal que la altura de caída de las partículas sea cero (Yamamuro & Wood, 2004).

El método de reconstitución por medio de sedimentación es ideal para simular el proceso de sedimentación natural de depósitos de suelo formados bajo el agua. Además de obtenerse grados iniciales de saturación elevados (Kwan & Mohtar, 2020). Una desventaja es la posible formación de un acomodo de partículas con orientaciones predefinidas, más aún si la sedimentación se realiza por etapas (Cresswell et al., 1999).

Para la obtención de densidades relativas objetivo, se puede aplicar vibración en el pedestal del triaxial o impactos leves en los lados del molde con un mango de goma. También es posible calibrar la abertura de salida del contenedor de modo que la velocidad de vertido acomode las partículas a una densidad objetivo.

Pluviación

El método de reconstitución por pluviación consiste en depositar partículas de suelo en forma de lluvia dentro del molde acoplado al pedestal del triaxial. En la actualidad existen varios dispositivos para tal efecto (e.g., Cresswell et al., 1999; Dave & Dasaka, 2012) y son dise-

ñados tomando en cuenta la intensidad de deposición, uniformidad de la lluvia de arena y altura de caída de las partículas de arena. Para efectos ilustrativos, el pluviador diseñado por el escritor es presentado y descrito. La Figura 7 ilustra el método de reconstitución mediante pluvitación. El pluviador diseñado por el escritor consiste de dos tubos transparentes, los cuales tienen adheridos en sus orificios inferiores tapas con aberturas de igual área. El diámetro de los tubos es seleccionado de modo que un tubo pueda ser insertado en el otro y este a su vez dentro del molde acoplado al pedestal del triaxial. La altura de los tubos es determinada de acuerdo a la cantidad de material que va ser reconstituido.

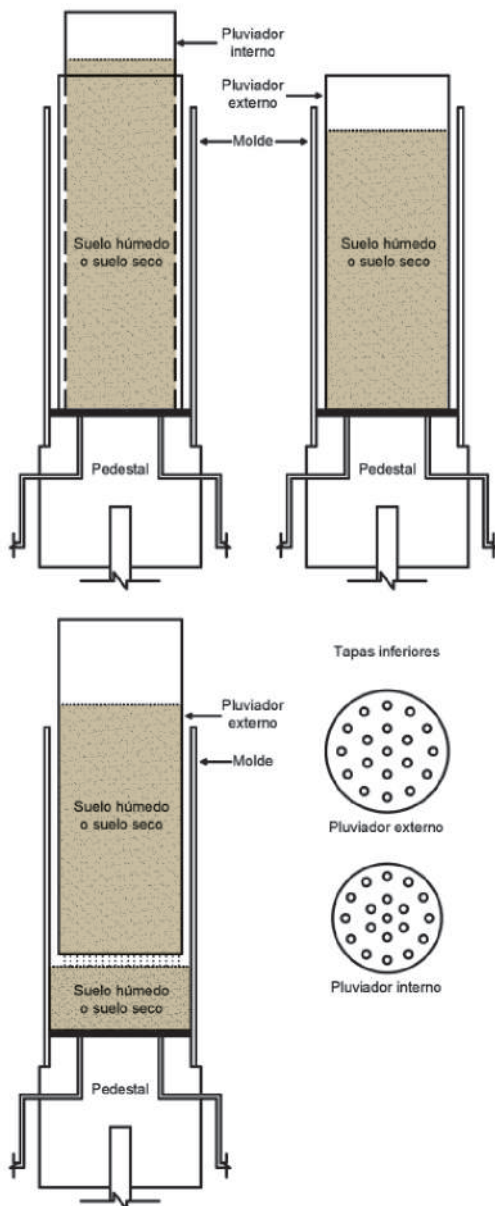


Figura 7. Método de reconstitución mediante pluvitación.

En primera instancia, los tubos son posicionados en la base del molde. Luego, se vierte material arenoso, en condiciones secas o húmedas, dentro del tubo de menor diámetro. Este tubo es verticalmente levantado de modo que la altura de caída de la lluvia de partículas sea cero. De esta manera el material es depositado en el tubo de mayor diámetro. El proceso es repetido con el tubo de mayor diámetro, obteniéndose así el espécimen de suelo arenoso reconstituido. La ventaja de hacer una doble pluvitación es la de evitar un acomodo de partículas con orientaciones predefinidas durante el traslado de material hacia el dispositivo y durante la reconstitución. La intensidad de deposición es controlada por la cantidad y tamaño de las aberturas de las tapas inferiores. Esto posibilita obtener densidades relativas objetivas con mayor facilidad, por lo tanto, no se requieren aplicar procesos de densificación. Sin embargo, es necesario una calibración previa. La uniformidad de la lluvia de arena es lograda a través de una distribución simétrica y homogénea de las aberturas de las tapas inferiores.

La reconstitución mediante pluvitación posibilita obtener especímenes de suelo con densidades uniformes y resultados repetibles. Además de evitar la inserción de planos o acomodo de partículas con orientaciones predefinidas dentro de la masa de suelo (Cresswell et al., 1999; Dave & Dasaka, 2012).

DISCUSIÓN

Según Kuerbis & Vaid (1988), un método de reconstitución debe cumplir los siguientes criterios:

- El método deber ser capaz de producir especímenes de suelo arenoso de sueltos a densos en un rango de densidad esperado dentro del depósito de suelo *in situ*.
- El espécimen de suelo debe tener una relación de vacíos uniforme.
- El espécimen de suelo debe estar bien mezclado sin segregación de tamaño de partículas.
- El método de reconstitución debe simular el modo de deposición del suelo encontrado en el depósito.

Respecto al primer punto, los métodos de reconstitución presentados en este trabajo posibilitan obtener especímenes de suelo arenoso en un rango aceptable en términos de densidad relativa. Cabe destacar que la obtención de especímenes de arena en un estado suelto es más complicada que para un estado denso.

La obtención de una relación de vacíos uniforme a lo largo de un espécimen reconstituido es posible por los métodos aquí descritos, a excepción de aquellos que se realizan en condiciones sumergidas ya que el agua induce una segregación de tamaños de partículas de suelo. La experiencia del laboratorista es esencial para lograr

reconstituciones uniformes, especialmente para aquellos métodos donde hay mayor tendencia en un acomodo de partículas de suelo con orientaciones predefinidas. Por otro lado, las técnicas de densificación pueden afectar la uniformidad del espécimen reconstituido, particularmente cuando la estructura del suelo llega a ser meta-estable (Monkul & Yamamuro, 2010). La altura de caída de las partículas de suelo durante la reconstitución también es un factor clave, puesto que puede inducir mayores densidades en la base que en la cabeza del espécimen. Además de inducir segregación de tamaños de partículas de suelo (Vaid & Negusse, 1984).

Teniendo en cuenta que los procesos geológicos y combinaciones de éstos dan origen y modifican las características geotécnicas de un depósito de suelo a lo largo de su historia geológica, un método de reconstitución que aproxime la condiciones *in situ* del material siempre será más factible, aunque tal labor puede ser compleja para la gama de situaciones que pueden encontrarse en la superficie de la tierra. En la literatura técnica, estudios comparativos incluyendo muestras de arena de alta calidad han mostrado que el método de reconstitución influye en la respuesta esfuerzo-deformación-resistencia del material y que puede no reflejar la respuesta mecánica de la masa de suelo en condiciones *in situ* (e.g., Høeg et al., 2000; Huang & Huang, 2007; Vaid et al., 1999; Yamamuro & Wood, 2004). Es recomendable un análisis al momento de seleccionar un método de reconstitución y en lo posible validarlo con resultados de ensayos realizados en muestras de suelo de alta calidad.

Es recomendable la aplicación de métodos de reconstitución de especímenes de suelo de grano grueso que no involucren energía de impacto, como los utilizados en ensayos de compactación (ASTM D1557, 2021; ASTM D698, 2021), y sean realizados directamente en el equipo triaxial (Cresswell et al., 1999; Lade et al., 1998). Esto con el propósito de mantener intactas las características de las partículas de suelo en términos de forma (i.e., evitar fisuramientos y/o trituración) y prevenir perturbaciones adicionales en el espécimen causadas durante el desconfinamiento, extracción, tallado, manipuleo y transporte al equipo triaxial.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Métodos de reconstitución empleados para la caracterización mecánica de suelos de grano grueso en ensayos triaxiales fueron presentados y descritos en este artículo. Los métodos incluyeron apisonamiento, deposición, sedimentación y pluviación bajo diferentes condiciones de saturación y procedimiento. Técnicas de densificación para cada método presentado también fueron descritas. Un análisis crítico fue realizado con el fin de identificar las ventajas y desventajas de los métodos de reconstitución.

La información presentada en este trabajo proporciona conocimientos en materia de reconstitución de especímenes de suelo de grano grueso que pueden ser empleados como punto de partida en programas experimentales que incluyan ensayos triaxiales. Además de proporcionar información técnica para la selección de un método y de variables que controlan la conformación de estructuras de suelo.

Las observaciones realizadas a cada uno de los métodos de reconstitución aquí presentados posibilitan una mayor comprensión sobre los efectos de la estructura del suelo en la respuesta mecánica de suelos de grano grueso.

AGRADECIMIENTOS

Apoyo financiero fue proporcionado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (COLCIENCIAS), Programa No 757-2016. El apoyo de esta institución es altamente apreciado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D1557. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Modified Effort*. ASTM.
- ASTM D698. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Standard Effort*. ASTM.
- Carraro, J. A., & Prezzi, M. (2008). A New Slurry-Based Method of Preparation of Specimens of Sand Containing Fines. *Geotechnical Testing Journal*, 31(1), 100207. <https://doi.org/10.1520/GTJ100207>
- Cresswell, A., Barton, M. E., & Brown, R. (1999). Determining the Maximum Density of Sands by Pluviation. *Geotechnical Testing Journal*, 22(4), 324–328. <https://doi.org/10.1520/GTJ11245J>
- Dave, T. N., & Dasaka, S. M. (2012). Assessment of Portable Traveling Pluviator to Prepare Reconstituted Sand Specimens. *Geomechanics and Engineering*, 4(2), 79–90. <https://doi.org/10.12989/gae.2012.4.2.079>
- Høeg, K., Dyvik, R., & Sandbækken, G. (2000). Strength of Undisturbed versus Reconstituted Silt and Silty Sand Specimens. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 126(7), 606–617. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:7\(606\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:7(606))
- Huang, A. B., & Huang, Y. T. (2007). Undisturbed Sampling and Laboratory Shearing Tests on a Sand with Various Fines Contents. *Soils and Foundations*, 47(4), 771–781. <https://doi.org/10.3208/sandf.47.771>

- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes. *Géotechnique*, 43(3), 351–451. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.351>
- Kuerbis, R., & Vaid, Y. P. (1988). Sand Sample Preparation—The Slurry Deposition Method. *Soils and Foundations*, 28(4), 107–118. https://doi.org/10.3208/sandf1972.28.4_107
- Kwan, W. S., & Mohtar, C. El. (2020). A Review on Sand Sample Reconstitution Methods and Procedures for Undrained Simple Shear Test. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14(8), 851–859. <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1461988>
- Ladd, R. S. (1978). Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 16–23. <https://doi.org/10.1520/GTJ10364J>
- Lade, P. V., Liggio, C. D. J., & Yamamuro, J. A. (1998). Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand. *Geotechnical Testing Journal*, 21(4), 336. <https://doi.org/10.1520/GTJ11373J>
- Lade, P. V., & Yamamuro, J. A. (1997). Effects of Nonplastic Fines on Static Liquefaction of Sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 918–928. <https://doi.org/10.1139/t97-052>
- Monkul, M. M., & Yamamuro, J. A. (2010). Influence of Densification Method on Some Aspects of Undrained Silty Sand Behavior. *Internacional Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*.
- Murthy, T. G., Loukidis, D., Carraro, J. A. H., Prezzi, M., & Salgado, R. (2007). Undrained Monotonic Response of Clean and Silty Sands. *Géotechnique*, 57(3), 273–288. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.3.273>
- Vaid, Y. P., & Negussey, D. (1984). Relative Density of Pluviated Sand Samples. *Soils and Foundations*, 24(2), 101–105. https://doi.org/10.3208/sandf1972.24.2_101
- Vaid, Y. P., Sivathayalan, S., & Stedman, D. (1999). Influence of Specimen-Reconstituting Method on the Undrained Response of Sand. *Geotechnical Testing Journal*, 22(3), 187–195. <https://doi.org/10.1520/GTJ11110J>
- Yamamuro, J. A., & Wood, F. M. (2004). Effect of Depositional Method on the Undrained Behavior and Microstructure of Sand with Silt. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(9–10), 751–760. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.06.004>
- Zlatović, S., & Ishihara, K. (1997). Normalized Behavior of very Loose Non-Plastic Soils: Effects of Fabric. *Soils and Foundations*, 37(4), 47–56. https://doi.org/10.3208/sandf.37.4_47

