Formación de grandes volúmenes de arena mediante pluviación

Claudia M. González & Miguel P. Romo
Engineering Institute, National Autonomous University of Mexico, Mexico City, Mexico

ABSTRACT
This paper presents an experimental investigation focused on design of a new pluviation device to form large specimens (48000 cm^3) to be tested in laboratory. For the design of this equipment, the technique of pluviation to form conventional specimens in laboratory was evaluated, by sand dispersion tests and measurement of volumetric weights of a specific sample. Finally, it is commented about the design and the validity of this new device of pluviation, this equipment is characterized by its ability to reproduce homogeneous sand deposits.

RESUMEN
Este documento presenta una investigación experimental enfocada al diseño de un nuevo equipo de pluviación para la formación en laboratorio de grandes volúmenes de arena (48000 cm^3). Para el diseño de este equipo, se evaluó la técnica de pluviación empleada para la formación de especímenes convencionales en laboratorio, mediante pruebas de dispersión de arena y de medición de pesos volumétricos de una muestra específica. Finalmente, se comenta sobre el diseño y la validación del nuevo equipo de pluviación, el cual se caracteriza por su capacidad de reproducir depósitos de arena homogéneos.

1 INTRODUCCIÓN

A la fecha han sido desarrolladas diversas investigaciones experimentales que conllevan la formación de especímenes de arena con dimensiones que superan las muestras manejadas habitualmente en un laboratorio de Mecánica de Suelos (e.g. Walker y Whitaker, 1967; Pyke, 1973; Bathurst y Zarnani, 2008). Uno de los métodos útiles para la formación de este tipo de depósitos es la "pluviación", la cual presenta ventajas frente a los métodos vibratorios y de pisonamiento. Lo Presti et al. (1992) indican que la técnica de pluviación brinda una mayor densidad seca, no causa rotura en las partículas, existe un efecto menor de segregación y una mejor reproducibilidad; por su parte, Rad y Tumay (1985) reporta que esta técnica además de proveer especímenes relativamente homogéneos asemeja la formación natural del depósito de suelo por sedimentación; adicionalmente, Ishihara y Okada (1978) señalan que especímenes formados por depositación bajo la acción de la gravedad adquieren una inherente microestructura anisotrópica.

Entre los equipos para pluviar arena se distinguen las mallas o elementos difusores (Cresswell et al. 1999), las rejillas (Lee y Coffing, 2000) y las tolvas móviles (De Alba, 1975). Usualmente el uso de mallas y de rejillas ha sido reportado para la elaboración de especímenes con volúmenes habituales (aproximadamente entre 80 cm^3 y 2000 cm^3), mientras que el empleo de tolvas móviles ha sido reportado para generar volúmenes considerables de suelo (superiores a los 2000 cm^3, e.g. $2.8x10^6$ cm^3). Este documento presenta un nuevo equipo de pluviación, que combina la técnica de pluviación con mallas y con rejilla, para la formación de depósitos de arena de 48000 cm^3.

2 TÉCNICAS DE PLUVIACIÓN

El proceso de pluviación se basa en generar una lluvia constante y uniforme de arena en un área específica. En laboratorio, esto se puede lograr mediante el empleo de mallas, rejillas o tolvas.

2.1 Pluviación con mallas

Se basa en generar lluvia de arena, haciendo que ésta pase a través de una retícula metálica. El diseño de la malla o retícula consiste en definir la abertura de la misma en función del diámetro máximo de las partículas de arena a pluviar. La malla seleccionada debe permitir el abastecimiento continuo de arena sin presentar taponamiento.

2.2 Pluviación con rejilla

Consiste en producir una lluvia de arena, donde el material pasa a través de una placa con un cierto patrón de orificios. El diseño de la rejilla depende del diámetro máximo de las partículas a pluviar y la selección de un patrón de perforación (triangular o cuadrado).

2.3 Pluviación con tolva

En este caso, el material a pluviar se abastece con la ayuda de una tolva móvil, la cual puede desplazarse vertical y horizontalmente de manera constante, de tal forma que permite conformar un relleno mediante capas.

La descripción de esta técnica es sólo con fines informativos, ya que esta investigación sólo consideró los procesos de pluviación con mallas y con rejilla.

3 MATERIAL Y EQUIPO

A continuación se describe el material y el equipo empleados en la investigación.

3.1 Material

Todos los ensayes reportados fueron realizados con arena producto de trituración de roca ígnea (basalto) y por ende con una distribución granulométrica artificial, correspondiente a arena mal graduada de fina a media, (figura 1). El banco de material donde fue explotada la roca se ubica en México, en el estado de Querétaro. La tabla 1 presenta datos generales de la arena manejada en esta investigación.

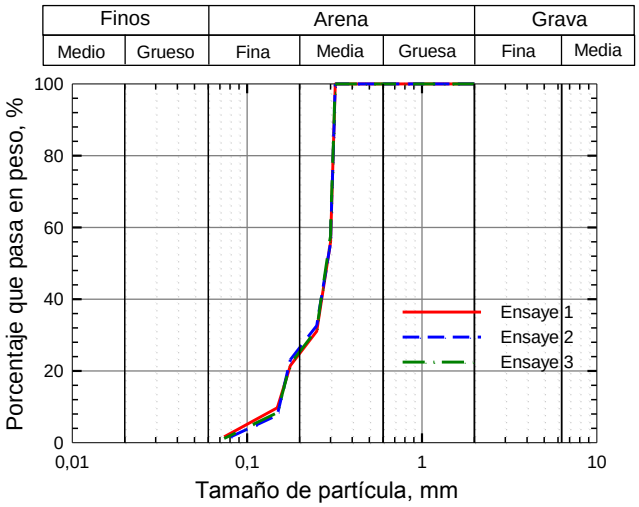

Figura 1. Distribución granulométrica.

Tabla 1. Características del material.

Característica	Valor	Unidades
Densidad de sólidos	2.62	---
Peso volumétrico	1.37	g/cm^3
Contenido de agua	0.20 – 0.70	%
Arena	98.40 – 99.30	%
Finos	1.60 – 0.70	%
Diámetro de partícula D_{10}	0.15 – 0.16	mm
Diámetro de partícula D_{30}	0.24 – 0.25	mm
Diámetro de partícula D_{60}	0.30 – 0.31	mm
Coeficiente de uniformidad	1.88 – 2.03	---
Coeficiente de curvature	1.13 – 1.31	---

3.2 Equipo

Los componentes principales de los equipos utilizados en la etapa experimental son:

1) Siete mallas de 20 cm x 20 cm, con abertura de 4.23 mm (1/6''), seleccionada arbitrariamente como la abertura mínima de uso comercial (figura 2a). Esta malla permite un abastecimiento continuo de arena sin presentar taponamiento de la misma; además, la abertura al ser menor que la sugerida por Rad et al. (1985), favorece la formación de depósitos de arena uniformes.

2) Una rejilla con un patrón de orificios cuadrado, donde el diámetro y el espaciamiento de éstos es de 4 mm y 10 mm respectivamente (figura 2b). Estas medidas se encuentran entre los rangos recomendados por Lee et al. (2000).

La figura 3 presenta un esquema general del equipo empleado, donde se especifican todos sus componentes.

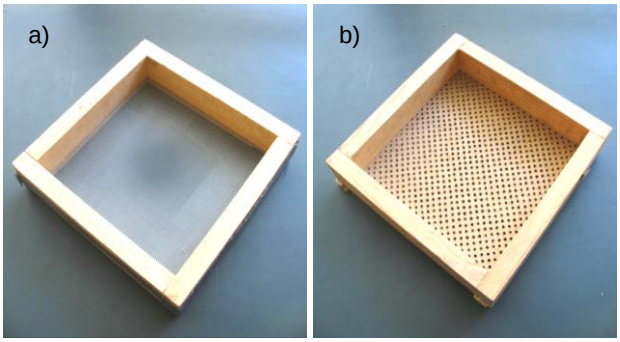

Figura 2. Componentes principales.

4 ENSAYES EXPERIMENTALES

Para plantear el diseño de un nuevo equipo de pluviación, se realizaron pruebas, bajo presión atmosférica, de dispersión de arena y de medición de pesos volumétricos en una muestra determinada. Durante estas pruebas se evaluaron, de manera independiente y conjunta, las técnicas de pluviación con empleo de mallas y de rejilla.

En la figura 3, se puede ver que las variables manejadas durante los ensayes son: altura total de caída (Hd = 20, 50, 80 y 110 cm), número de mallas (de una a siete) y arreglo de mallas y de rejilla-mallas. Para el arreglo rejilla-mallas, la rejilla fue ubicada siempre encima de la serie de mallas y la altura total de caída fue de 20 cm, correspondiente a la altura del depósito para la arena pluviada.

4.1 Ensayes de dispersión de arena

Estas pruebas consistieron en medir el área de influencia de 300 gramos de arena depositada a través de diferentes secuencias de mallas y de rejilla-mallas. Cabe mencionar que a la fecha no se ha encontrado evidencia de este tipo de prueba.

El empleo de mallas permite dispersar una columna de arena, generando una lluvia de arena uniforme; mientras que el uso de una rejilla consiste en generar pequeñas columnas contiguas de arena, con el propósito de disminuir la posible segregación de material al ser depositado.

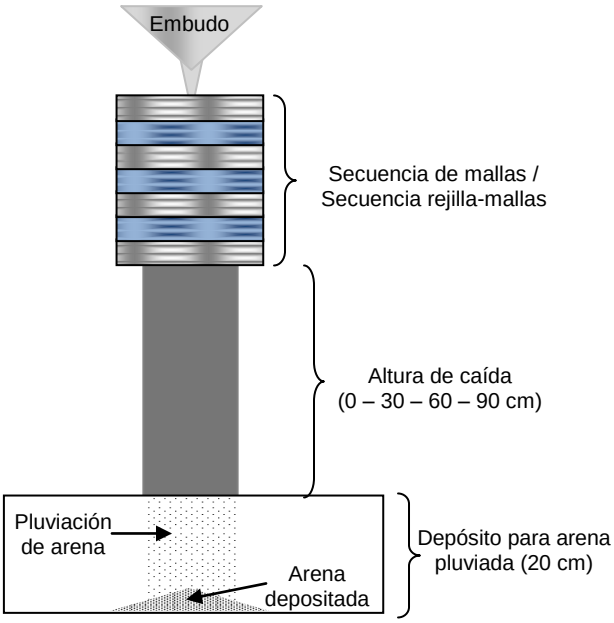

Figura 3. Equipo. (Fuera de escala)

La dispersión de arena se define como la relación entre el área abarcada por la arena pluviada, a_2, y el área de salida de la arena al inicio de la pluviación, a_1 (3.14 cm^2). Resultados de esta dispersión respecto a la cantidad de mallas considerada en el arreglo de sólo mallas o rejilla-mallas, se presentan en la figura 4; estos resultados corresponden al valor promedio de una serie de tres o más ensayes por secuencia de mallas y de rejilla–mallas.

En general, la dispersión de la arena aumenta con el incremento tanto de la altura total de caída como del número de mallas; aunque para Hd igual a 20 cm y 50 cm lo anterior no se cumple. El empleo de una rejilla, con o sin mallas, permite obtener un área de influencia de la arena pluviada, notablemente mayor a la obtenida con diferentes secuencias de mallas; lo anterior evidencia la efectividad del empleo de una rejilla en la conformación de depósitos de arena, cuya sección transversal sea mucho mayor a las manejadas habitualmente en un laboratorio de Mecánica de Suelos.

4.2 Ensayes de medición de pesos volumétricos

Estas pruebas consistieron en obtener el peso volumétrico de la arena depositada en un recipiente de volumen conocido (86.63 cm^3), empleando arreglos de mallas y de rejilla-mallas similares a los usados en las pruebas de dispersión de arena. En este caso, las alturas totales de caída fueron: 0, 50, 80 y 110 cm.

Debido a que la arena empleada presentó porcentajes de contenido de agua muy bajos (0.2% – 0.7%), las pruebas fueron realizadas con la arena en condición natural. El cálculo del peso volumétrico, γ, se realizó con la expresión 1.

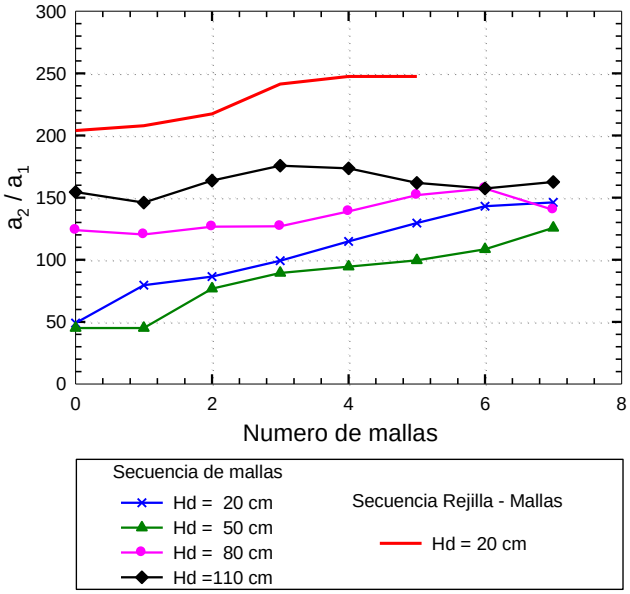

Figura 4. Resultados de ensayes de dispersión de arena.

La figura 5 presenta los resultados obtenidos en este tipo de pruebas; estos datos corresponden al valor promedio de una serie de tres o más ensayes por prueba. Para la técnica de pluviación con empleo de mallas, existe un valor máximo de peso volumétrico que depende de una relación inversa entre la altura total de caída y el número de mallas, ya que a mayor Hd menor es el número de mallas necesario para alcanzar el peso volumétrico máximo y viceversa.

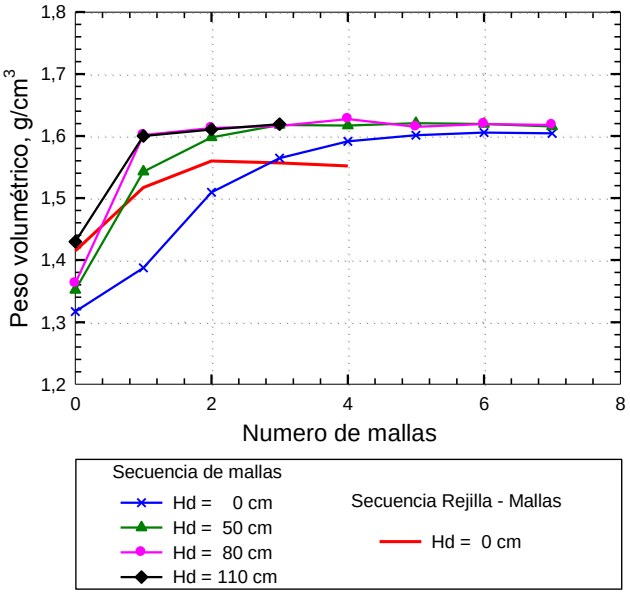

Figura 5. Resultados de ensayes de medición de pesos volumétrico.

En el caso de pluviación con el arreglo rejilla-mallas se observa un comportamiento similar; sin embargo, para este caso el valor máximo de γ difiere en 4% del obtenido con mallas y es alcanzado con tan sólo dos mallas.

$$\gamma = \text{Peso} / \text{Volumen} \quad [1]$$

La obtención de un valor máximo constante de γ indica que la condición de uniformidad en la lluvia de arena ha sido alcanzada.

5 EQUIPO DE PLUVIACIÓN

A partir de los resultados presentados anteriormente y con la finalidad de conformar depósitos de arena homogéneos de 48000 cm^3 de volumen, se diseñó un equipo de pluviación que conjuga el empleo de una rejilla y de dos mallas. Las características principales de dicho equipo son:

1) Una rejilla con un patrón de orificios cuadrado, donde el diámetro y el espaciamiento de éstos es de 4 mm y 10 mm respectivamente. Con esta rejilla es posible generar columnas de arena en un área semejante al área, vista en planta, del depósito de arena a formar (40 cm x 60 cm).

2) Dos mallas con abertura de 4.23 mm (1/6'') y área de 40 cm x 60 cm. La función de estas mallas es difuminar las columnas de arena, a fin de eliminar las posibles segregaciones de material.

3) Altura de caída de 7 cm; esta altura corresponde a altura mínima permitida por el recipiente que albergará el depósito de arena.

4) Realización de la pluviación bajo presión atmosférica.

Las figuras 6 y 7 presentan un esquema y una fotografía del equipo de pluviación.

5.1 Formación de un depósito de arena

Una vez construido el equipo diseñado, es posible conformar depósitos de arena homogéneos, de acuerdo a los siguientes pasos:

1) Fijar el equipo de pluviación en la parte superior del molde que albergará el depósito de arena a formar (figura 6).

2) Manteniendo los orificios de la rejilla cerrados para evitar la salida de la arena, se vacía dentro del contenedor para abastecimiento de arena, una cantidad de material conocida en peso, W_1, la cual es ligeramente mayor a la cantidad necesaria para conformar totalmente el depósito de arena, W_2.

3) Posteriormente, se abren los orificios de la rejilla, dando inicio a la lluvia de arena.

4) Al terminar de caer toda la arena y por ende, llenado en exceso el depósito con arena pluviada, se retira el equipo de pluviación.

5) A continuación, con la ayuda de una regla y una aspiradora como elemento succionador, se enraza el depósito de arena hasta un nivel previamente definido. El empleo de una aspiradora evita generar presión sobre la superficie del depósito conformado.

Los pasos descritos hasta ahora comprenden exclusivamente la formación de un depósito; en la siguiente sección se describe el proceso para calcular el peso volumétrico del modelo.

5.2 Obtención del peso volumétrico de un depósito de arena

Para obtener el peso volumétrico de un depósito de arena ya conformado, es preciso continuar los pasos de la sección anterior con los siguientes:

6) Una vez enrasado el depósito, se obtiene el peso de material de exceso, W_3, retirado y almacenado con la aspiradora.

7) Conocidos W_1 y W_3, se calcula el peso del depósito conformado, W_2, como

$$W_2 = W_1 - W_3 \quad [2]$$

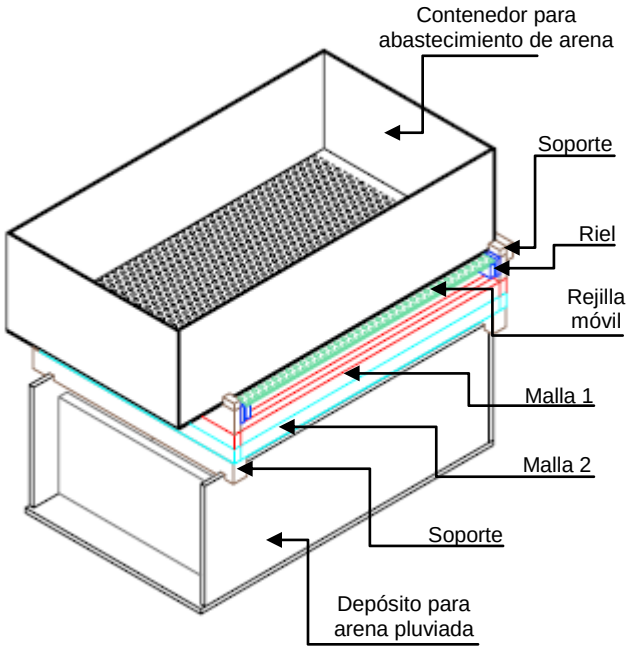

Figura 6. Esquema del equipo de pluviación.

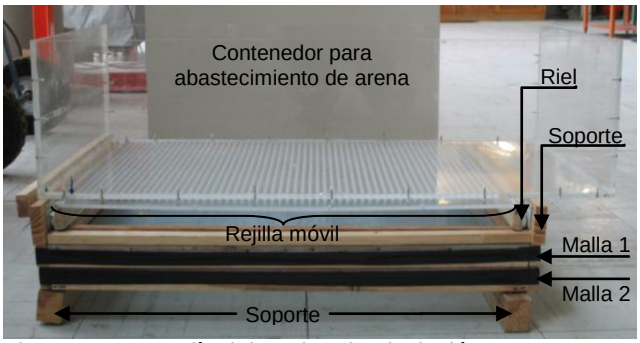

Figura 7. Fotografía del equipo de pluviación.

8) Finalmente, se calcula el peso volumétrico del depósito (expresión [1]), como la relación entre W_2 y el volumen del mismo, conocido previamente y para este caso igual a 48000 cm^3.

6 VALIDACIÓN DEL EQUIPO DE PLUVIACIÓN

Para comprobar la capacidad de conformar rellenos homogéneos del equipo de pluviación, se realizó una serie de mediciones de pesos volumétricos al interior de un depósito de arena de 48000 cm^3, conformado con dicho equipo. Para esto, de manera previa al proceso de pluviación, pequeños moldes (volumen entre 87 cm^3 y 129 cm^3) fueron distribuidos espacialmente dentro del depósito sin arena, posteriormente se realizó la pluviación y a continuación, con ayuda de la aspiradora fueron extraídos los moldes (figura 8), finalmente se obtuvo el peso volumétrico de cada molde.

La figura 9 presenta los valores del γ de cada molde respecto a su posición. La poca variación entre los resultados obtenidos (máxima de 2.4%), refleja la efectividad del proceso de pluviación, mediante el equipo propuesto, en la formación de depósitos de arena homogéneos.

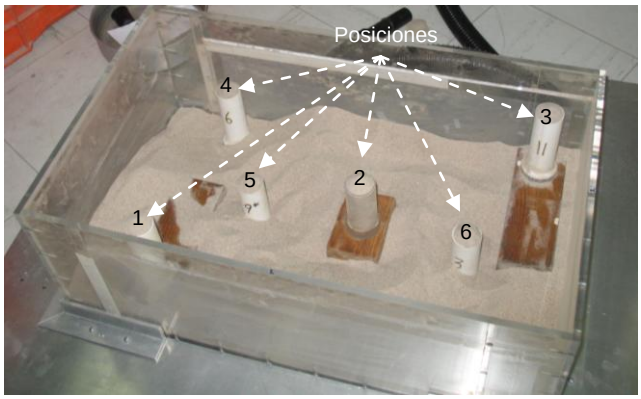

Figura 8. Validación del equipo de pluviación.

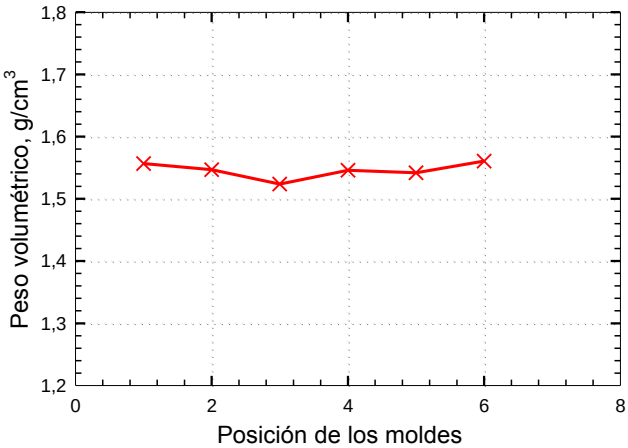

Figura 9. Resultados de la validación del equipo de pluviación.

7 CONCLUSIONES

La conformación experimental de depósitos de arena de grandes dimensiones, puede realizarse con la técnica de pluviación; ésta puede realizarse con el empleo de mallas y de rejilla. Sin embargo, la combinación de ambos elementos (mallas y rejilla) permite optimizar el proceso de pluviación.

El equipo propuesto es una buena alternativa para conformar depósitos de arena homogéneos de grandes dimensiones. Aunque el equipo presentado corresponde a dimensiones específicas, los principios empleados en su diseño son aplicables para depósitos de dimensiones aún mayores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración para el desarrollo de esta investigación por parte del personal del Taller Mecánico y del Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería – UNAM, así como a los estudiantes de servicio social Daniel Palencia y Francisco Zúñiga. Igualmente, agradecen al Instituto de Ingeniería – UNAM, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT y al Posgrado de Ingeniería de la UNAM por el apoyo económico otorgado al primer autor.

REFERENCIAS

Bathurst, R. J. and Zarnani S. 2008. Numerical modelling of EPS seismic buffers, *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Goa, India, p.p. 425 - 432.

Cresswell, A., Barton, M. and Brown, R. 1999. Determining the maximum density of sands by pluviation, *Technical note, American Society for Testing and Materials*, pp. 324 - 328.

De Alba, P. 1975. Determination of soil liquefaction characteristics by a large scale laboratory test, *Ph. D. Dissertation*, University of California, Berkeley.

Ishihara, K. and Okada, S. 1978. Effects of stress history on cyclic behavior of sand, *Soils and Foundations*, 18(4): 31 - 45.

Lee, L. T. Jr. and Coffing, L. R. Jr. 2000. Dry sand pluviation device, *United States Patent*, Patent Number 6,109,486.

Lo Presti, D. C. F., Pedroni, S. and Crippa, V. 1992. Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: A comparative study, *American Society for Testing and Materials*, pp. 180 - 189.

Pyke, R. M. 1973. Settlement and liquefaction of sands under multi-directional loading, *Ph. D. Dissertation*, University of California, Berkeley.

Rad, N. S. and Tumay, M. T. 1985. Factors affecting sand specimen preparation by raining, *Technical note, American Society for Testing and Materials*, pp. 31 - 37.

Walter, B. P. and Whitaker, T. 1967. An apparatus for forming uniform beds of sand for model foundation tests, *Geotechnique*, 17: 161 - 167.