

## EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA COMPACTACIÓN EN LA RESISTENCIA A CORTO PLAZO DE GRAVA LIMOSA (GM) A-2-4 (PR-108)

C. PAREDES & B. CAMACHO \*

C. PAREDES \*\*

Recibido: 21 de Febrero de 2013

Aprobado: 17 de Mayo de 2013

### Resumen

La compactación es el proceso de mejoramiento de suelo mayormente utilizado en ingeniería civil. Dependiendo de la estructura a realizar, existen especificaciones que determinan el contenido de humedad óptimo y el peso unitario seco máximo que debe alcanzar el suelo en el campo para satisfacer los requerimientos en resistencia y deformación máxima permitida. Sin embargo, frecuentemente se compacta por debajo de dichas especificaciones y la respuesta del suelo es diferente a la esperada.

Ésta investigación contiene una evaluación experimental de la resistencia al corte no drenada de suelo compactado clasificado como A-2-4 (GM). Éste estudio involucró la caracterización inicial del suelo, el desarrollo de 84 pruebas de compactación y 51 ensayos triaxiales tipo UU para muestras formadas con diferentes contenidos de humedad y bajo 3 grados de compactación utilizando un molde de dimensiones reducidas. Los resultados finales de éste estudio muestran que los especímenes compactados fuera del rango de compactación especificado para la construcción de terraplenes nunca alcanzan los valores de resistencia al corte del suelo A-2-4 cuando son elaborados teniendo en cuenta dichas especificaciones.

### 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del comportamiento de suelos compactados es fundamental en el campo de la ingeniería relacionada al desarrollo de proyectos utilizados para mejorar las propiedades mecánicas del suelo. Frecuentemente, si no se lleva a cabo una buena supervisión en el campo, se compactan terraplenes por debajo de las especificaciones establecidas y el suelo responde en forma diferente a la esperada. Por tal razón, es necesario desarrollar investigaciones conducidas a conocer cómo éste fenómeno afecta la resistencia no drenada de suelos no saturados. En el caso de suelos compactados, ésta caracterización puede ser obtenida en el laboratorio, mediante pruebas triaxiales no consolidadas – no drenadas (UU) de especímenes de suelo elaborados con diferentes porcentajes de humedad y energías de compactación. La energía de

compactación se varía para simular diferentes grados de compactación en el suelo. En proyectos de carreteras el grado de compactación del material se especifica en términos del peso seco máximo medido en el laboratorio utilizando el método de proctor (estándar y/o modificado). Es importante mencionar que el tipo de prueba a realizar en el laboratorio depende de la energía de compactación utilizada en el campo. Por tal razón, se estudió el comportamiento mecánico (resistencia) de un suelo clasificado como A-2-4 según AASHTO (GM según USCS), variando el contenido de humedad y el grado de compactación utilizando tres energías, generando así tres curvas de compactación. La primera curva simuló la compactación del suelo para la energía generada por el proctor modificado 2700 kN-m/m<sup>3</sup> (56125 lb-pie/pie<sup>3</sup>), la cual represen-

\*Universidad de Puerto Rico. Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura. Mayagüez, Puerto Rico.

\*\* Ingeniera Civil de la Universidad del Cauca. Magister en Ciencias en Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico. Correo electrónico: acarolina.paredes@gmail.com

ta la energía de compactación generada típicamente en el campo. La segunda curva representó el comportamiento del suelo compactado a una energía que producía un peso específico igual al 95% de la densidad máxima seca generada por el proctor modificado la cual representa la energía mínima permisible de compactación teniendo en cuenta las especificaciones de carreteras de Puerto Rico para la construcción de terraplenes (PRHTA). Finalmente, se generó una curva que representa una compactación igual al 85% del peso específico máximo del Proctor Modificado (i.e., suelo compactado por debajo de las especificaciones de la PRHTA).

Se llevaron a cabo las respectivas pruebas índices para clasificar el material y una serie de pruebas triaxiales no consolidadas – no drenadas (UU) con el fin de observar el efecto que produce el nivel de compactación en los parámetros de resistencia a corto plazo de muestras parcialmente saturadas, tal y como han sido compactadas. Dicha caracterización se realizó mediante la construcción de mapas de contorno para la cohesión y el ángulo de fricción interna teniendo en cuenta el método de los 15 puntos.<sup>1</sup>

## 2. SITIO DE MUESTREO

El material utilizado para el desarrollo de esta investigación fue obtenido del proyecto correspondiente al desvío de la carretera PR-108 Fase I (AC - 010821). Este proyecto se encuentra localizado en Miradero - Mayagüez, sobre la carretera 108, km 2.8. Una vista aérea con las coordenadas geográficas de la zona de extracción del material y su correspondiente ubicación en el mapa de Puerto Rico se puede observar en la Figura 1. Teniendo en cuenta la información reportada por Mattson<sup>2</sup> se establece que una tercera parte de los 640 km<sup>2</sup> del área de Mayagüez está cubierta de material aluvial mientras que el resto se encuentra cubierto por rocas ígneas y sedimentarias.

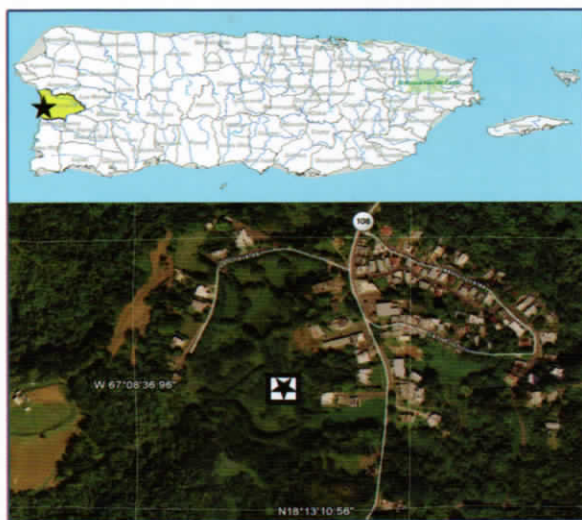


Figura 1 Localización de la Zona de Extracción del Material A-2-4 (PR-108)

## 3. PROCEDIMIENTO

Durante esta investigación se estudió experimentalmente en el laboratorio el efecto de la energía de compactación de un suelo clasificado como A-2-4. Se midieron los parámetros de resistencia a corto plazo de especímenes de suelo compactados a diferentes porcentajes de humedad sometidos a 3 energías de compactación. La primera energía de aproximadamente 2700 kN-m/m<sup>3</sup> (56125

<sup>1</sup> Kulhawy, F. H., Duncan, J. M., and Seed, H. B., "Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Embankments During Construction," US Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MI, College of Engineering, University of California, Berkeley, pp. 164. 1969.

<sup>2</sup> Mattson P. "Geology of the Mayaguez Area, Puerto Rico," Geological Society of America Bulletin, v.71, pp. 319-362. 1960.

lb- pie/pie<sup>3</sup>) simulando la energía suministrada por el Proctor Modificado, la segunda y tercera energía de 1200 kN-m/m<sup>3</sup> (24872 lb- pie/pie<sup>3</sup>) y 192 kN-m/m<sup>3</sup> (3986 lb- pie/pie<sup>3</sup>), las cuales produjeron respectivamente, un peso específico similar al 95 y 85 por ciento de la energía generada por el Proctor Modificado. Inicialmente, se midieron las propiedades índice de éste suelo, para clasificarlo según el sistema de clasificación AASTHO y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, por sus siglas en inglés). Luego, se generó experimentalmente la curva de compactación para una energía similar a la suministrada por el Proctor modificado utilizando un molde reducido de 5.08 cm (2 pulg) de diámetro y 10.16 cm (4 pulg) de altura verificando su correspondencia en peso específico máximo, humedad óptima y parámetros de resistencia a corto plazo con los resultados obtenidos utilizando el molde especificado en la Norma ASTM D-1557.

Teniendo en cuenta estos resultados, se encontraron experimentalmente (por prueba y error) las energías de compactación que producían un peso específico máximo igual al 95 y 85% del proctor modificado (estas muestras fueron formadas utilizando el molde y martillo reducido). Una vez se estableció el número de capas e impactos necesarios para producir las energías de compactación con el molde y el martillo reducido, se procedió a elaborar cincuenta y cuatro (54) especímenes de suelo siguiendo el método de los quince (15) puntos.<sup>3</sup> Este método consiste en someter al suelo a tres energías de compactación diferentes y elaborar un mínimo de quince (15) especímenes de suelo por cada una de ellas. La Tabla 1 muestra un resumen general de la cantidad de muestras empleadas; incluyendo además el tipo de molde utilizado para compactar los especímenes ensayados durante la fase de resistencia al corte no consolidada – no drenada (UU) de esta investigación. Tabla 1. Descripción General de las Muestras

Identificación	Cantidad Muestras	Tipo de Molde	Descripción
PM-100	3	Estándar (E)	Compactado al 100% yd max del proctor modificado.
PR-100	21	Reducido (R)	Compactado al 100% yd max del proctor modificado.
PR-95	15	Reducido (R)	Compactado al 95% yd max del proctor modificado.
PR-85	15	Reducido (R)	Compactado al 85% yd max del proctor modificado.

#### Compactadas Ensayadas en Pruebas Triaxiales UU para el Desarrollo de ésta Investigación.

Los primeros 3 especímenes compactados a un 100% yd max, se elaboraron en el molde de compactación especificado por la norma ASTM D-1557 con la finalidad de medir el efecto que pudiera tener el uso de un molde reducido en los parámetros de densidad máxima, humedad óptima y resistencia a corto plazo (resistencia no drenada, UU) del suelo compactado. Los resultados de estas pruebas se compararon con pruebas similares realizadas a muestras compactadas a un 100% yd max utilizando el molde reducido. Las demás muestras se utilizaron para medir el comportamiento del suelo a diferentes contenidos de agua y energías de compactación. Estas muestras se compactaron con porcentajes de humedad diferentes, teniendo en cuenta que una de ellas correspondiera a la humedad óptima de compactación y que los contenidos de agua restantes variaran de forma equitativa por encima y por debajo del contenido de agua óptimo ( $\pm 2\%$  y  $\pm 4\%$  del wopt).

Cada espécimen se sometió a pruebas triaxiales tipo UU utilizando tres (3) presiones de confinamiento diferentes: 34.5 kPa (5 lb/pulg<sup>2</sup>), 103.4 kPa (15 lb/pulg<sup>2</sup>) y 205.8 kPa (30 lb/pulg<sup>2</sup>). Estas presiones de confinamiento se eligieron teniendo en cuenta las presiones que usualmente experimenta el suelo en el campo cuando el uso final son terraplenes. Estas pruebas se realizaron con el

<sup>3</sup> Kulhawy, F. H., Duncan, J. M., and Seed, H. B., Op. cit.

propósito de medir la variación en la resistencia a corto plazo del suelo bajo diferentes energías de compactación, incluyendo casos donde se compacta por debajo de las normas establecidas por PRHTA.

### 3.1 Molde y Martillo de Compactación

Las muestras de suelo compactadas que se utilizaron durante esta investigación se formaron con la ayuda de un molde y un martillo de compactación reducido. Este equipo de compactación reducido ha sido utilizado en el pasado en el laboratorio de suelos de la Universidad de Virginia<sup>4</sup> y por la Universidad de Puerto Rico<sup>5</sup> con el propósito de optimizar la cantidad de suelo a utilizarse durante la formación masiva de muestras de suelo compactadas. Además de optimizar la cantidad de suelo a utilizarse, éste equipo de compactación reducido elimina el tiempo requerido durante el proceso de labrado para la formación de muestras compactadas a utilizarse en pruebas triaxiales, las cuales requieren una razón de altura a diámetro (H/D) de 2. Es importante mencionar que el equipo de compactación estandarizado genera muestras con diámetro de 100 mm (4 in) y altura de 116 mm (4.584 in), los cuales no cumplen con la razón de altura sobre diámetro para ensayos de resistencia al corte, requiriéndose un mayor tiempo de labrado para obtener muestras con diámetros de 50 mm (2 in) y una razón H:D de 2:1. La Figura 2 muestra una comparación visual entre el equipo de compactación estandarizado y el equipo de compactación reducido a utilizarse durante esta investigación.



Figura 2 Comparación entre el Equipo de Compactación Estandarizado por la ASTM y el Equipo de Compactación Utilizado Durante esta Investigación (Reducido)

### 3.2 Procedimiento de Compactación

Para evaluar la relación que existe entre muestras de suelo compactadas a diferentes grados de compactación y contenidos de humedad fue necesario elaborar 3 tipos de especímenes. Los primeros especímenes se compactaron aplicando la energía generada por el proctor modificado (100% de la energía del proctor modificado).

Los especímenes restantes se formaron utilizando dos energías de compactación que para éste suelo en específico generaron un 95% y 85% del peso específico máximo alcanzado cuando se aplicaba la energía del proctor modificado.

Luego de establecer el comportamiento de la

<sup>4</sup> Geiman, C. M., "Stabilization of Soft Clay Subgrades in Virginia Phase I Laboratory Study," M.Sc. Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, pp. 89, 2005

<sup>5</sup> Reyes, A., "Engineering Behavior of Soft Clays Treated with Circulating Fluidized Bed Combustion Fly Ash". Tesis de Maestría Universidad de Puerto Rico,

curva de compactación al variar la energía y el contenido de agua, se procedió a elaborar los especímenes con el objetivo de estudiar el efecto que tiene el grado de compactación en la resistencia al corte no drenada del material mediante pruebas triaxiales tipo UU. Para cada energía de compactación y contenido de agua se elaboraron entre 3 y 4 especímenes similares. Los datos de estas muestras fueron utilizados para generar una gráfica de compactación detallada (Figura 3) que evidencia las propiedades de humedad y peso unitario seco obtenidas en el suelo A-2-4 para las tres energías de compactación investigadas.

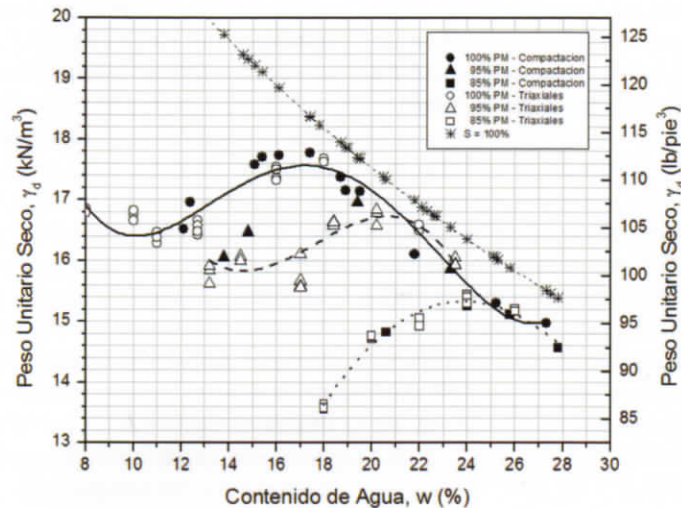


Figura 3 Curvas de Compactación para el Suelo A-2-4 (PR-108), Grava Limosa con Arena (GM) a Diferentes Grados de Compactación.

#### 4. RESULTADOS

Para evaluar los parámetros de resistencia al corte a corto plazo del suelo A-2-4 (PR-108) se desarrollaron pruebas triaxiales no consolidadas – no drenadas (UU). Estas pruebas se realizaron para muestras de suelo compactadas cuya razón de altura y diámetro (H/D) fuera igual a 2 según requerido por la norma ASTM D-2850. Se utilizaron muestras compactadas a diferentes grados de compactación (100%, 95% y 85% de la energía generada por el proctor modificado), formadas para cinco contenidos de agua ( $w_{opt}$ ,  $\pm 2\% w_{opt}$ ,  $\pm 4\% w_{opt}$ ). La resistencia al corte de las muestras compactadas se midió entonces en el laboratorio para tres presiones de confinamiento 34.5 kPa (5 lb/pulg<sup>2</sup>), 103.4 kPa (15 lb/pulg<sup>2</sup>) y 205.8 kPa (30 lb/pulg<sup>2</sup>), simulando los esfuerzos que experimentan los suelos en el campo durante la construcción de terraplenes en Puerto Rico. Por lo tanto, fue necesario for-

mar un mínimo de 15 muestras para cada energía de compactación considerada.

#### 4.1 Efecto del Grado de Compactación en las Curvas de Esfuerzo – Deformación

Se realizaron un total de 51 pruebas triaxiales no consolidadas – no drenadas (UU) para estudiar el comportamiento a compresión del suelo A-2-4. En la Figura 4 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para las muestras de suelo compactadas al contenido de humedad óptimo para los diferentes grados de compactación evaluados en esta investigación. Comparando el comportamiento del suelo podemos observar que a medida que el grado de compactación disminuye, el comportamiento de esfuerzo– deformación va variando entre uno quebradizo (para 100%  $\gamma_d$  max) hasta uno dúctil (para 85%  $\gamma_d$  max), generándose un comportamiento intermedio para las muestras compacta-

das al 95% yd max. Se puede observar que para los dos primeros grados de compactación, los cuales se encuentran dentro de las especificaciones para la construcción de terraplenes, las muestras se comportan en forma quebradiza, es decir, alcanzan esfuerzos elevados a pequeñas deformaciones. Sin embargo, este comportamiento difiere para las muestras compactadas al 85% yd max, en las cuales solo se presenta falla por deformación. Dichas muestras presentan un comportamiento dúctil independientemente de la presión de confinamiento aplicada al suelo.

Del mismo modo podemos comparar el esfuerzo máximo alcanzado por las muestras compactadas con la energía mínima especificada para la construcción de terraplenes (95% yd max) con el esfuerzo máximo alcanzado por los especímenes compactados por debajo de las especificaciones. Las muestras compactadas al 95% yd max alcanzaron esfuerzos máximos de 290, 500 y 680 kN/m<sup>2</sup> al ser sometidas a presiones de confinamiento de 34.5 kPa (5 lb/pulg<sup>2</sup>), 103.4 kPa (15 lb/pulg<sup>2</sup>) y 205.8 kPa (30 lb/pulg<sup>2</sup>),

respectivamente, mientras que las muestras compactadas por debajo de las especificaciones experimentaron un esfuerzos axial máximo de 110, 150 y 170 kN/m<sup>2</sup> para las mismas presiones de confinamiento.

Por lo tanto podemos concluir que las muestras compactadas por debajo de las especificaciones experimentan una reducción en el esfuerzo máximo que varía entre 62 y 75% para presiones de confinamiento variando entre 34.5 y 205.8 kPa (5 y 30 lb/pulg<sup>2</sup>), lo cual se podría traducir a una reducción significativa en la resistencia del material cuando éste es compactado por debajo de las especificaciones. En adición, el comportamiento de esfuerzo-deformación se verá afectado de acuerdo al grado de compactación, de manera que además de experimentar una reducción en esfuerzos se genera un cambio en su comportamiento. Como consecuencia, debido a su comportamiento dúctil, el suelo desarrollará mayores deformaciones a medida que se incrementa la carga hasta generar una falla la cual se dará de forma progresiva.

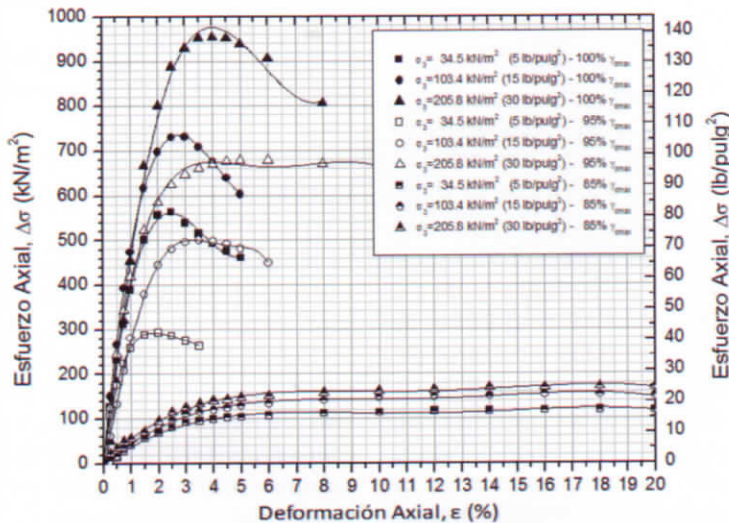


Figura 4 Comparación de la Curvas Esfuerzo-Deformación de Muestras de Suelo Compactadas al 100%, 95%, y 85% yd máx. Utilizando el Molde Reducido Compactadas en el Contenido de Agua Óptimo

## 4.2 Parámetros de Resistencia

Los parámetros de resistencia al corte no drenados: cohesión, ( $c$ ) y ángulo de fricción interna, ( $\phi$ ) fueron medidos para los tres (3) grados de compactación que fueron seleccionados en ésta investigación (100, 95, 85% de  $\gamma_d$  max) y a diferentes contenidos de humedad.

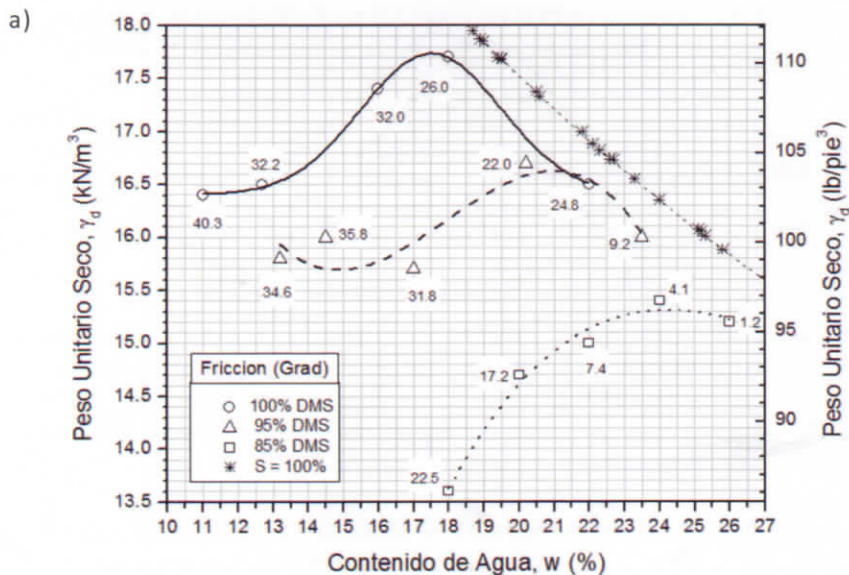
Analizando la tendencia del ángulo de fricción interna vemos que a medida que incrementamos el grado de compactación el ángulo de fricción interna tiende a aumentar. El incremento en el ángulo de fricción interna fue estudiado por Penman en 1953 para limos saturados.

En esta investigación Penman<sup>6</sup> establece que a medida que el suelo compactado se vuelve más denso, las fuerzas transmitidas a las partículas incrementan, aumentando así el grado de entrelazamiento. Este a su vez va a incrementar la resistencia al corte y por lo tanto el ángulo de fricción interno.

Finalmente, estos parámetros de resistencia fueron utilizados para generar la relación que existe entre el contenido de agua y la densidad seca del suelo y los parámetros de resistencia mediante la generación de mapas de contorno.

Las Figuras 5 y 6 muestran los mapas de contorno obtenidos para el suelo A-2-4 (GM) PR-108 mostrando la relación entre los parámetros de resistencia ( $c$  y  $\phi$ ). Estos mapas son de utilidad para caracterizar el material y observar como varían los parámetros de resistencia de éste suelo cuando es sometido en el laboratorio a diferentes energías de compactación.

Una vez generados, éstos mapas pueden ser utilizados como guías de compactación a seguir en el campo para obtener la resistencia deseada.



<sup>6</sup> Penman, A. D. M., "Shear characteristics of a saturated silt, measured in triaxial compression," Geotechnique 3, No. 8, pp. 312-328. 1953.

b)

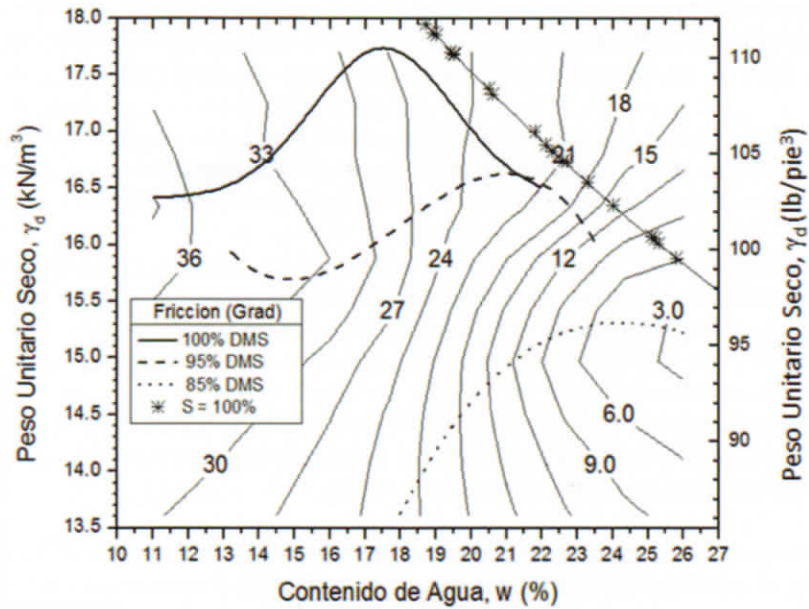
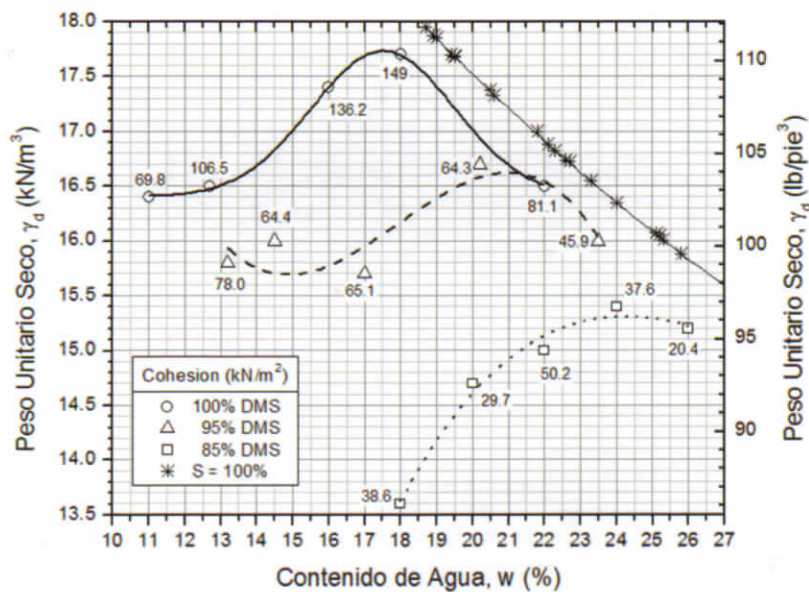


Figura 5 a) Variación del Ángulo de Fricción y b) Mapa de Contorno para Fricción del Suelo A-2-4 (GM), PR-108.

a)



b)

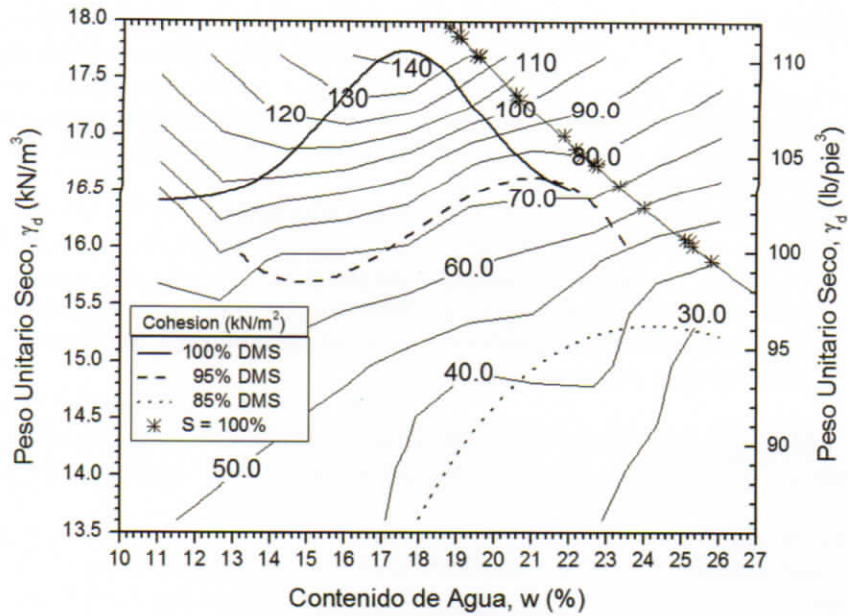


Figura 6 a) Variación de la Cohesión y b) Mapa de Contorno para Cohesión del Suelo A-2-4 (GM), PR-108.

En el mapa de contorno para fricción (Figura 5 b) se puede observar la notable influencia que tiene el contenido de agua sobre la variación de  $\phi$ . Se presenta un comportamiento en líneas casi verticales a lo largo del eje de abscisas del mapa de contorno. En dicho mapa, se puede observar que un incremento en el peso unitario seco máximo de las muestras que son compactadas del lado seco de la curva de compactación producen un descenso en la magnitud del ángulo de fricción, sin embargo, si se compacta del lado húmedo, el comportamiento es inverso, es decir, un incremento en el peso unitario seco máximo produce un incremento en el ángulo de fricción.

Por otro lado, si comparamos el ángulo de fricción que se obtiene al compactar muestras de suelo A-2-4 (GM) alrededor del contenido de agua óptimo (aproximadamente  $w = 18\%$ ) para el 100 y 95% de la energía del proctor modificado, es posible observar que en ambos casos se obtiene un ángulo de fricción de 27 grados, lo cual corrobora que el rango especificado por PRHTA para la compactación de terraplenes en el campo es efectivo.

Por su parte, en el mapa de cohesión (Figura 6 b) es evidente que el contenido de agua, no ejerce mayor influencia sobre la cohesión, es entonces, el peso específico seco máximo y la energía de compactación los parámetros que más influyen sobre ella. Adicional a ello, es posible observar que dichas líneas no presentan una tendencia específica para todo el mapa de contorno, es decir, para lograr un mismo valor de cohesión, bajo igual energía de compactación, es necesario densificar más el suelo cuando se compacta del lado húmedo de la curva de compactación que del lado seco de la misma.

También se observa que a medida que la energía de compactación disminuye las líneas de contorno empiezan a tener una mayor inclinación. De esta forma se puede apreciar cómo para el 100% y 95% de la energía del proctor modificado hay un comportamiento aproximadamente horizontal entre las líneas de cohesión, pero al bajar la energía al 85% dicho comportamiento se torna aleatorio.

## 5. CONCLUSIONES

- El Suelo clasificado como A-2-4 (GM) de la carretera PR-108 presentó un comportamiento atípico en cuanto a la forma de la curva de compactación obtenida al formar las muestras con una energía igual al 95% del peso unitario seco máximo producido por el proctor modificado. Evidenciando que, además de las propiedades índices del suelo y su respectiva mineralogía, la energía de compactación aplicada influye directamente sobre la irregularidad de las curvas.
- El martillo y molde de compactación reducido presenta ventajas con respecto al equipo estandarizado en la norma ASTM D-1557 relativas al ahorro de material y efectividad para el labrado de los especímenes a ensayar en pruebas de resistencia al corte.
- El mapa de contorno para cohesión resultante de ésta investigación nos permite observar la poca influencia que tiene la variación del contenido de agua sobre el parámetro "c" cuando las muestras son compactadas al 100% y 95% de la energía del proctor modificado. Sin embargo, a medida que se compacta por debajo de las especificaciones, la influencia del agua sobre dicho parámetro se hace más evidente. Igualmente, se puede observar que la energía de compactación influye drásticamente en los valores de cohesión obtenidos. Muestras compactadas a un 85% y 95% del peso específico seco máximo del proctor modificado no alcanzarán los valores de cohesión que adquieren las muestras elaboradas con una energía del 100% yd max aunque se varié el contenido de agua y el peso específico del suelo.
- El mapa de contorno para fricción, por su parte, nos deja ver la notable influencia que tiene el contenido de agua sobre dicho parámetro. Similarmente, se puede observar que el ángulo de fricción de las muestras compactadas dentro del rango de las especificaciones para carreteras puede alcanzarse variando ligeramente la combinación contenido de agua / peso específico seco. Sin embargo, muestras de suelo compactadas por debajo de este rango logran valores

muy inferiores para la resistencia por fricción del suelo. Estas características aquí observadas, corroboran la efectividad del rango de compactación establecido por carreteras para especificar la energía de compactación en el campo.

## BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. "American Association of State Highway and Transportation Officials Materials," Specifications, Washington, D.C. 1994.

ASTM D-1557. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort," ASTM International. 2000.

ASTM D-2487. "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)," ASTM International. 2000.

ASTM D-2850. "Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils," ASTM International. 1995.

ASTM D-698. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort," ASTM International. 2000.  
Geiman, C. M., "Stabilization of Soft Clay Subgrades in Virginia Phase I Laboratory Study," M.Sc. Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, pp. 89. 2005.

Kulhawy, F. H., Duncan, J. M., and Seed, H. B., "Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Embankments During Construction," US Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MI, College of Engineering, University of California, Berkeley, pp. 164. 1969.

Lee, P. Y., and Suedkamp R. J., "Characteristics of Irregularly Shaped Compaction Curves of Soils," Highway Research Record, No. 381, National Academic of Sciences, Washington D.C., pp. 1-9. 1972.

Mattson P., "Geology of the Mayaguez Area, Puerto Rico," Geological Society of America Bulletin, v.71, pp. 319-362. 1960.

Penman, A. D. M., "Shear characteristics of a saturated silt, measured in triaxial compression," *Geotechnique* 3, No. 8, pp. 312-328. 1953.

Puerto Rico Highway and Transportation Authority. *Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Commonwealth of Puerto Rico*, pp 130-162. 2005.

Reyes, A. "Engineering Behavior of Soft Clays Treated with Circulating Fluidized Bed Combustion Fly Ash". Tesis de Maestria Universidad de Puerto Rico, Mayaguez. 2007.

Seed, H. B., and Chan, C. K., "Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays," *Journal Soil Mechanics Foundation Division, ASCE*, Vol. 85 No. SM5. 1959.

