



SCT
SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES



Determinación de la curva de compactación Proctor estándar de suelos de terraplén o subrasante usando el equipo giratorio

Natalia Pérez García
Paul Garnica Anguas
Luis Alberto Bautista Bernal
Jocelyn Ortiz Cruz

**Publicación Técnica No. 604
Sanfandila, Qro, 2020**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Determinación de la curva de compactación
Proctor estándar de suelos de terraplén o
subrasante usando el equipo giratorio**

Publicación Técnica No. 604
Sanfandila, Qro, 2020

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Natalia Pérez García, el Dr. Paul Garnica Anguas, y los estudiantes Luis Alberto Bautista Bernal del Tecnológico de Oaxaca y Jocelyn Ortiz Cruz del Tecnológico de Tlaxiaco, Oaxaca.

Este trabajo es el producto final del proyecto de investigación interna II-11/18. Estandarización del compactador giratorio para obtener la curva de compactación Proctor estándar.

Contenido

| | Página |
|---|--------|
| Índice de figuras | v |
| Índice de tablas | vii |
| Sinopsis | ix |
| Abstract | xi |
| Resumen ejecutivo | xiii |
| Introducción | 1 |
| 1. Antecedentes | 3 |
| 1.1. Introducción | 3 |
| 1.2. La compactación en equipo giratorio | 3 |
| 1.3. Obtención de la curva de compactación con compactador giratorio | 4 |
| 2. Materiales y procedimientos de prueba | 11 |
| 2.1. Muestreo de los materiales de prueba | 11 |
| 2.2. Preparación de los suelos y determinación de las propiedades índice | 12 |
| 2.3. Determinación de la curva de compactación Proctor estándar con el método tradicional | 12 |
| 2.4. Determinación de la curva de compactación Proctor estándar utilizando el equipo giratorio | 13 |
| 3. Resultados y análisis | 17 |
| 3.1. Propiedades índice | 17 |
| 3.2. Determinación de la curva de compactación en equipo giratorio variando la presión vertical | 17 |
| 3.3. Curvas de compactación obtenidas en equipo giratorio | 19 |
| 4. Conclusiones | 31 |
| Referencias y Bibliografía | 33 |

Índice de figuras

| | Página |
|--|--------|
| Figura 1.1. Curvas de compactación obtenidas en el estudio de Browne (2006) | 5 |
| Figura 1.2. Curvas de compactación con presión vertical de 350 kPa | 6 |
| Figura 1.3. Curvas de compactación con presión vertical de 400 kPa | 6 |
| Figura 1.4. Curvas de compactación con método tradicional y las obtenidas con equipo giratorio (modificada de Khaled et al., 2017) | 7 |
| Figura 1.5. Resultados de Pérez et al. (2016) | 8 |
| Figura 2.1. Fotografías de tres de los suelos estudiados | 11 |
| Figura 2.2. Configuración de las variables en el equipo giratorio | 14 |
| Figura 2.3. Limpieza y engrase del molde | 14 |
| Figura 2.4. Colocación del material en el molde | 15 |
| Figura 2.5. Extracción y registro de peso y dimensiones de la muestra compactada | 15 |
| Figura 3.1. Curvas de compactación de la arcilla IMT. Curva Proctor estándar y las curvas obtenidas en equipo giratorio | 18 |
| Figura 3.2. Curvas de compactación del suelo de Guadalajara. Curva Proctor estándar y las curvas obtenidas en equipo giratorio | 18 |
| Figura 3.3. Curvas de compactación de la arcilla IMT. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 19 |
| Figura 3.4. Curvas de compactación de la arcilla de La Gasera. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 19 |
| Figura 3.5. Curvas de compactación de la arcilla del lago La Venta. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 20 |
| Figura 3.6. Curvas de compactación del suelo CL. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 20 |
| Figura 3.7. Curvas de compactación del suelo todo en uno. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 21 |
| Figura 3.8. Curvas de compactación del suelo de La Galera. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 21 |
| Figura 3.9. Curvas de compactación del suelo de Guadalajara. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 22 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 3.10. | Curvas de compactación del suelo 2 de Santa Lucia. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 22 |
| Figura 3.11. | Curvas de compactación del suelo 3 de Santa Lucia. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 23 |
| Figura 3.12. | Curvas de compactación del suelo de Misha. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 23 |
| Figura 3.13. | Curvas de compactación del suelo 1 de Santa Lucia. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 24 |
| Figura 3.14. | Curvas de compactación del suelo de Veracruz. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 24 |
| Figura 3.15. | Curvas de compactación del suelo de la ciclovía. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 25 |
| Figura 3.16. | Curvas de compactación del suelo de San José. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 25 |
| Figura 3.17. | Curvas de compactación del suelo de la base del HVS. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 26 |
| Figura 3.18. | Curvas de compactación del suelo Conín 08. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 26 |
| Figura 3.19. | Curvas de compactación del suelo Conín 09. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 27 |
| Figura 3.20 | Curvas de compactación del suelo de Los Cues. Curva Proctor estándar y la curva obtenida en equipo giratorio | 27 |

Índice de tablas

| | Página |
|--|--------|
| Tabla 2.1. Procedimientos utilizados para evaluar las propiedades índice | 12 |
| Tabla 3.1. Propiedades de los suelos en estudio | 17 |
| Tabla 3.2. Resumen de las variables utilizadas en equipo giratorio y propiedades de los suelos | 28 |

Sinopsis

Existen diferentes métodos de compactación para obtener la prueba Proctor estándar. Sin embargo, el avance en la tecnología ha puesto a disposición de los ingenieros equipos más sofisticados para la evaluación de propiedades de laboratorio. Uno de estos equipos es el compactador giratorio. Éste es utilizado principalmente para la compactación de mezclas asfálticas, sin embargo, en los últimos años se ha estado utilizando también para compactar suelos y materiales granulares.

En este trabajo se documenta una recomendación de procedimiento para la obtención de la curva de compactación de suelos que pasan la malla No. 4 usando el compactador giratorio. La recomendación está basada en resultados de curvas de compactación de varios suelos compactados en el equipo giratorio.

Abstract

There are different compaction methods to obtain the Proctor standard compaction curve. However, the advancement in technology has made available to engineers more sophisticated equipment for the evaluation of laboratory properties. One of these equipments is the gyratory compactor. This is mainly used to compact asphalt mixtures, however, in recent years it is also being used to compact soils and granular materials.

This document shows a recommendation for obtaining the standard compaction curve of soils passing sieve number 4 using the gyratory compactor. The recommendation is based on results of compaction curves of several soils compacted in the gyratory equipment.

Resumen ejecutivo

La evaluación de la curva de compactación Proctor estándar sigue un proceso que fue estandarizado en los años 30. Sin embargo, con el paso de los años, en el área de ingeniería de pavimentos se tienen diversas novedades tecnológicas en lo que se refiere a equipos de laboratorio, así como en equipos de construcción.

En campo, por ejemplo, para la construcción de capas compactadas se cuenta con los compactadores inteligentes cuyo trabajo es compactar el material, pero a la vez ir registrando la rigidez o módulo que se ha logrado en el material para determinar su calidad. El objetivo de estos equipos es hacer más eficientes los procesos constructivos.

En lo referente a equipos de laboratorio, los nuevos son automatizados, lo cual hace que el trabajo de los operadores sea mínimo. En este sentido, en el área de pavimentos y en específico para la compactación de mezclas asfálticas, se utiliza el compactador giratorio, ya que se considera que la estructura que adquiere la mezcla asfáltica compactada en este equipo es más parecida a lo que producen los compactadores de campo. Esto debido a la compactación por medio de presión vertical, además de que el equipo genera fuerzas de corte durante la compactación por la inclinación que se presenta en el molde durante el proceso.

En el estudio de suelos y materiales granulares también se ha propuesto el equipo giratorio como un equipo adecuado para compactar materiales que adquieran estructuras similares a las proporcionadas por los equipos de compactación de campo. Sin embargo, si se quiere utilizar el equipo en la compactación de suelos y materiales granulares también se deben proporcionar los procedimientos de prueba. El objetivo del estudio documentado en este reporte fue el de llegar a una recomendación para determinar curvas de compactación Proctor estándar utilizando el equipo giratorio.

En el capítulo uno de este documento se resumen algunos de los estudios en los que se han determinado las curvas de compactación con equipo giratorio y se han comparado con las curvas obtenidas con el método tradicional. Con los resultados publicados se pueden observar algunos de los problemas que se presentan en la determinación de la curva de compactación de suelos con equipo giratorio.

En el capítulo dos del documento se abordan los procedimientos de prueba utilizados. Los procedimientos de las propiedades índice no se detallan puesto que ya han sido documentados en otras investigaciones. Este capítulo está enfocado en el procedimiento utilizado para determinar la curva de compactación Proctor estándar con equipo giratorio.

En el capítulo tres se resumen las propiedades de los suelos estudiados y la comparativa de curvas de compactación Proctor estándar con método tradicional y las obtenidas con equipo giratorio. En este capítulo se resumen también las variables utilizadas para determinar las curvas con el equipo giratorio. Se menciona cuál sería la presión vertical para la cual se obtiene la curva Proctor estándar en función del tipo de suelo.

Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio.

Introducción

A la fecha el control de calidad de los materiales compactados se sigue realizando por medio del grado de compactación. De acuerdo con esto, se requieren parámetros como el peso volumétrico seco máximo del material obtenido en laboratorio y el peso volumétrico seco evaluado en campo. Con respecto al primero, la forma de determinarlo es por medio de la prueba Proctor estándar o Proctor modificada. De acuerdo con el procedimiento de estas pruebas, el material se compacta en un molde por medio de impactos. Algunos autores han documentado que el método de impactos no es la forma que más simula los procesos de compactación de los equipos de campo. Por esto, se han estudiado otros métodos de compactación para obtener suelos con estructuras más parecidas a las proporcionadas por los equipos de compactación de campo.

Es así que varios investigadores proponen el compactador giratorio como el equipo más adecuado para compactar suelos y materiales granulares. Sin embargo, es claro que, si se quiere proponer este equipo para determinar curvas de compactación, se deben proponer los procedimientos de prueba. En este documento se propone un procedimiento para obtener las curvas de compactación Proctor estándar de suelos que pasan la malla No. 4. Cabe señalar que es la primera propuesta ya que aún falta que se estudien otras variables que intervienen en el proceso de compactación.

1 Antecedentes

1.1. Introducción

La forma tradicional de obtener la curva de compactación de un material es utilizando las pruebas Proctor estándar o Proctor modificada, utilizando los procedimientos ASTM D698, ASTM D1557, AASHTO T99 o AASHTO T180. Estos métodos indican compactar el material en tres o cinco capas, en un molde de 10.1 cm o 15.24 cm de diámetro. El pisón utilizado tiene una masa de 2.5 kg o 4.54 kg y se usa para aplicar 25 o 56 impactos a cada capa de suelo.

En algunas investigaciones se ha reconocido que el método de impactos no es el que simula mejor el proceso de compactación ya que en campo, el proceso de amasado es la forma de transferencia de energía al suelo (González et al., 2004; citado por Camacho et al., 2007). Por esto, en los últimos años, se están llevando a cabo investigaciones en las que se están estudiando otras alternativas para compactar los materiales; una de ellas, es utilizando el compactador giratorio. En el siguiente inciso se resumen algunos de los estudios en los cuales se ha utilizado el compactador giratorio para la obtención de la curva de compactación Proctor estándar o modificada.

1.2. La compactación en equipo giratorio

La compactación con equipo giratorio es el resultado del trabajo del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos y del Departamento de Transporte de Texas. Este método de compactación promete ser un procedimiento alternativo para compactar materiales granulares.

La base de este método es la rotación del molde a un ángulo excéntrico con respecto a la vertical mientras se aplica una carga mediante los platos paralelos. Debido a que la preparación de la muestra puede ser en una capa, se evita la segregación de las partículas (Ping et al 2003, citado por Maclachan y Bagshaw, 2017). Se cree que este método aborda el problema de la orientación del agregado y reproduce de una mejor manera la matriz que el material tiene después de la compactación (Preston, 1991, citado por Maclachan y Bagshaw, 2017).

1.3. Obtención de la curva de compactación con compactador giratorio

Camacho et al (2007) indicaron que en 1962 en la Armada de los Estados Unidos se estudió el proceso de compactación giratoria en materiales de base y subbase encontrando que el método de compactación por impactos es poco recomendable en suelos no cohesivos, ya que la presión vertical genera pesos volumétricos mayores. Por otro lado, se encontró que los materiales deben compactarse con un ángulo de giro de entre 1 y 2 grados.

Otra investigación en el tema fue desarrollada por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de Florida. En esta investigación se realizó trabajo de campo y de laboratorio. De acuerdo con Camacho et al (2007), los tres puntos más sobresalientes del trabajo fueron:

- El método de compactación por impacto no es el más adecuado para arenas y suelos no cohesivos, debido a que los resultados en campo proporcionaron pesos unitarios superiores a los que se obtienen en el laboratorio y las humedades en campo eran menores a las de las pruebas de laboratorio.
- El método de laboratorio que dio resultados más cercanos a los obtenidos en campo, fue el método de compactación giratoria.
- Para obtener el peso unitario máximo del suelo estudiado se utilizó una presión vertical de 200 kPa, 1.25° de inclinación, 90 giros y una velocidad de 20 giros por minuto.

Por su parte, Browne (2006), presentó como tesis de maestría de la Universidad Estatal de Montana el trabajo titulado "Feasibility of using the gyratory compactor to determine compaction characteristics of soil". En este trabajo, el autor determinó las curvas de compactación de cuatro suelos utilizando el método tradicional y el método con equipo giratorio. Las variables controladas en el equipo giratorio fueron:

No. giros: 500

Presión vertical o confinamiento: 200 y 600 kPa

Velocidad: 30 rpm

Ángulo de giro: 1.25 grados

Cantidad de suelo compactado: 4000 y 4500 g

Algunos de los resultados obtenidos por Browne (2006) se ilustran en las Figura 1.1.

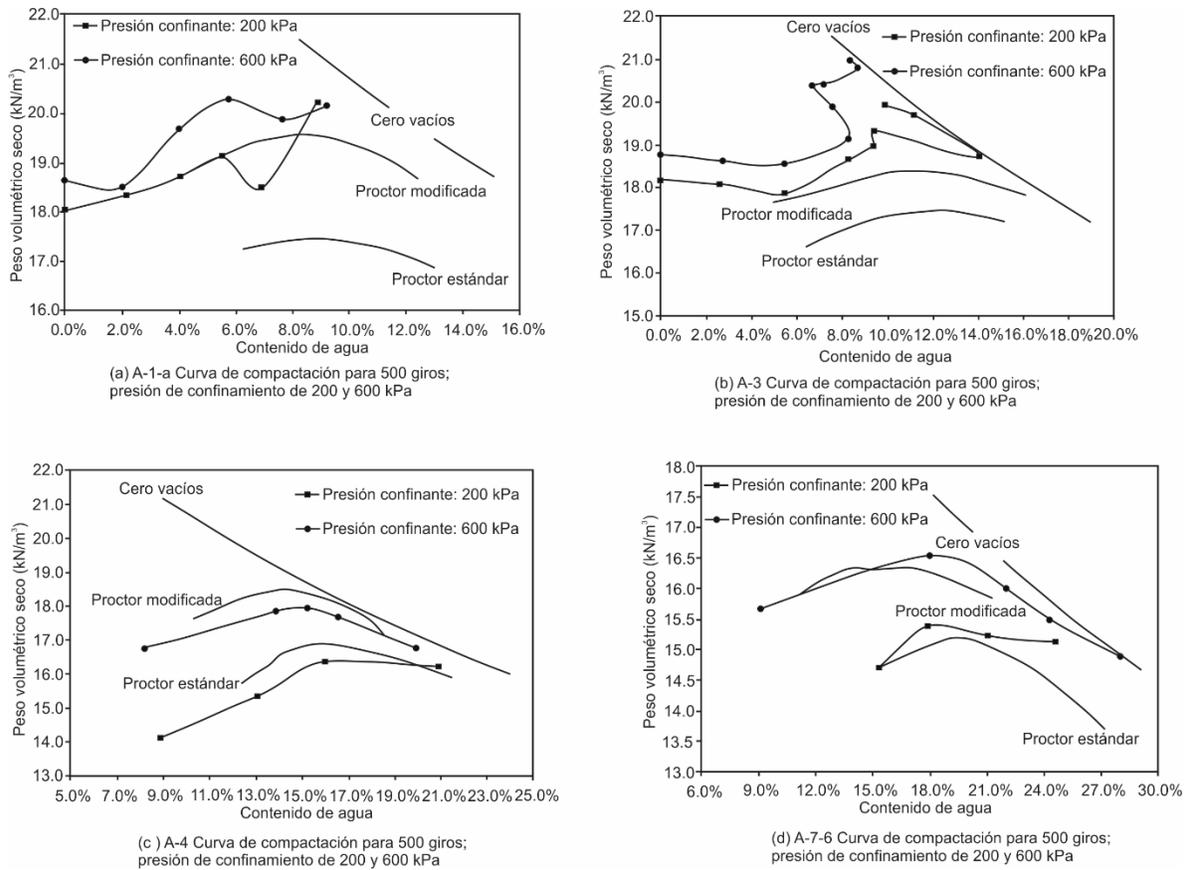


Figura 1.1. Curvas de compactación obtenidas en el estudio de Browne (2006)

La Figura 1.1 señala que para el suelo A-1-a, con 200 kPa de presión vertical se logran alcanzar los pesos volumétricos secos de la rama seca de la curva de compactación Proctor modificada, sin embargo, los últimos dos puntos están fuera de la tendencia de la curva. En el caso del suelo A-3, para presiones de 200 y 600 kPa, las curvas de compactación se encuentran por encima de la Proctor estándar y modificada; en los últimos puntos con los contenidos de agua más altos, el peso volumétrico seco no se reduce como se observa en una prueba tradicional, en este caso los pesos volumétricos secos se incrementaron. Para el suelo A-4 y A-7-6, las curvas de compactación obtenidas con el equipo giratorio están más próximas a las curvas de compactación tradicionales.

El autor indica que el flujo de agua en los suelos A-1-a y A-3 era un problema que se presentó en los puntos con contenidos de agua más altos. Por esto, el peso volumétrico seco se incrementó.

Otros autores como Camacho et al (2007) utilizaron un compactador giratorio Rainhat's SHRP para determinar la curva de compactación de una arena clasificada como SC. Las variables utilizadas para compactar fueron: 300 giros, 1.25 grados de ángulo, 30 rpm en velocidad y la presión vertical se estableció entre 100 y 400 kPa.

En las Figuras 1.2 y 1.3 se presentan los resultados en los cuales se observan para qué variables se obtuvo la curva de compactación Proctor modificada.

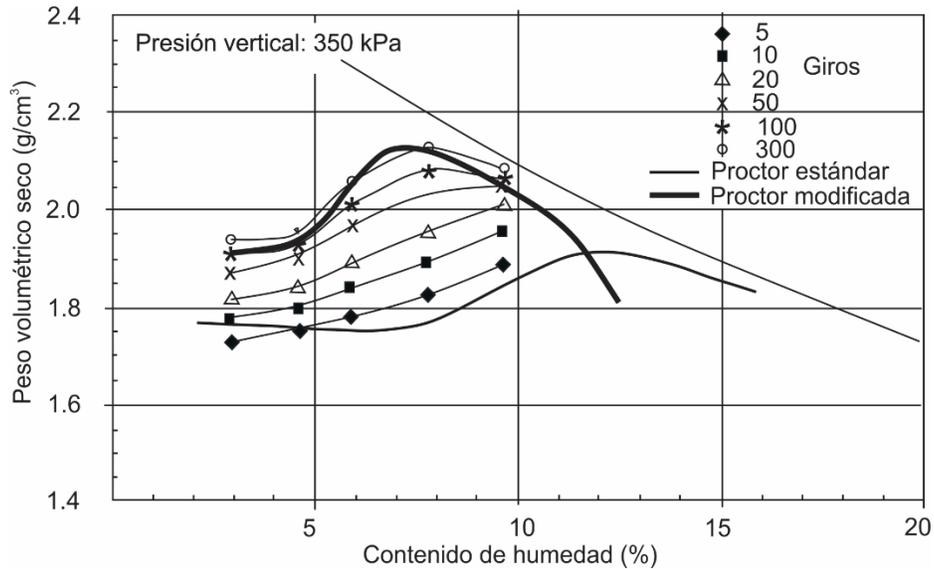


Figura 1.2. Curvas de compactación con presión vertical de 350 kPa

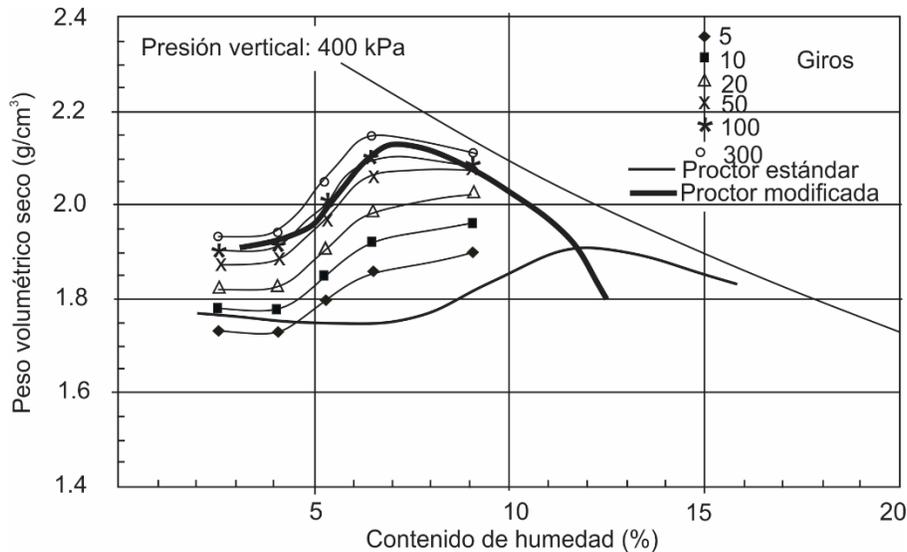


Figura 1.3. Curvas de compactación con presión vertical de 400 kPa

Las figuras anteriores indican que la curva de compactación Proctor modificada para el suelo SC se obtuvo con una presión vertical de 350 kPa y 300 giros o con una presión vertical de 400 kPa y 100 giros. Es importante notar que, con las presiones utilizadas en el estudio, se sobrepasó la curva de compactación Proctor estándar.

En 2017, Khaled et al. publicaron un artículo en el que muestran la determinación de curvas de compactación Proctor estándar y modificada utilizando un equipo giratorio Texas. Los autores de este artículo evaluaron dos suelos finos clasificados como CL-ML y CL.

Las curvas de compactación con equipo giratorio se determinaron controlando las siguientes variables: La presión vertical aplicada estuvo entre 200 y 600 kPa; se utilizó un ángulo de giro de 1.25 grados; 350 giros, 30 giros por minuto. La masa de prueba fue de 5000 gramos.

En la Figura 1.4 se muestran los resultados obtenidos. La figura indica que para el suelo A-4, la curva de compactación Proctor estándar se obtuvo con una presión vertical de 200 kPa y 350 giros; la modificada se obtuvo con el mismo número de giros, pero con una presión vertical de 600 kPa. Para el suelo A-7-6, la Proctor estándar se obtuvo con 90 giros y una presión vertical de 200 kPa y la curva modificada se obtuvo con 350 giros y presión vertical de 600 kPa.

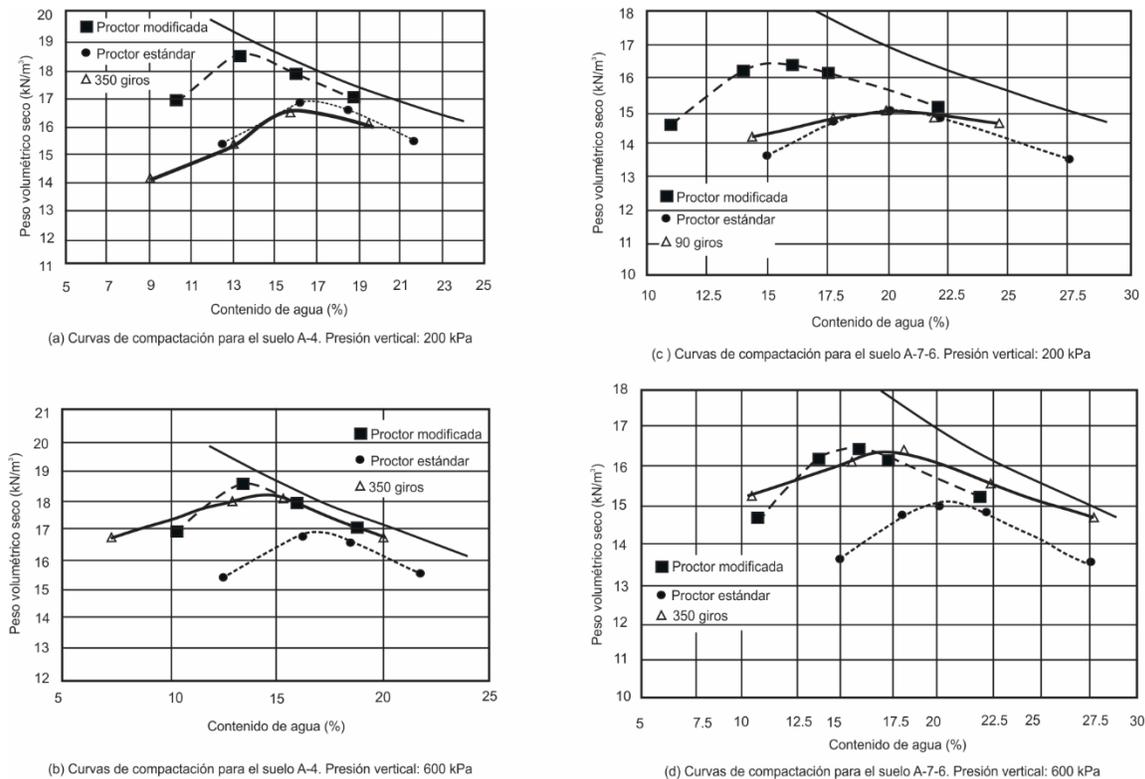


Figura 1.4. Curvas de compactación con método tradicional y las obtenidas con equipo giratorio (modificada de Khaled et al. 2017)

Pérez et al (2016) determinaron curvas de compactación con equipo giratorio para cinco suelos. Tres suelos clasificados como CH, un ML y otro como SM. En su artículo presentan la comparativa de curvas de compactación obtenidas con métodos tradicionales y con equipo giratorio.

Para obtener las curvas de compactación en el equipo giratorio, los autores indican que compactaron 2300 gramos de suelo húmedo. La presión vertical la variaron de 200 a 600 kPa y en algunos casos hasta 800 kPa. Se estudiaron dos ángulos de giro (1 y 1.25 grados). La velocidad se estableció con valores de 10, 20 y 30 giros por minuto.

La Figura 1.5 indica solo las curvas para velocidad de 30 giros/minuto, ángulo de 1.25 y peso volumétrico seco máximo obtenido a 500 giros. Se presentan las curvas a las diferentes presiones verticales.

Los resultados de Pérez et al. (2016) indican que para las arcillas 2 y 3 y el limo, las curvas de compactación Proctor estándar se obtienen con una presión vertical de 200 kPa. Para la arcilla 1, la presión vertical de 200 kPa proporciona pesos volumétricos secos mayores a los obtenidos en la curva Proctor estándar. En los suelos no se alcanzó la curva de compactación Proctor modificada con las presiones verticales utilizadas. Por otro lado, y como ya lo habían mostrado otros investigadores, en el suelo SM se tuvo flujo de agua y las curvas del giratorio son diferentes a las obtenidas con el método Proctor estándar o modificada.

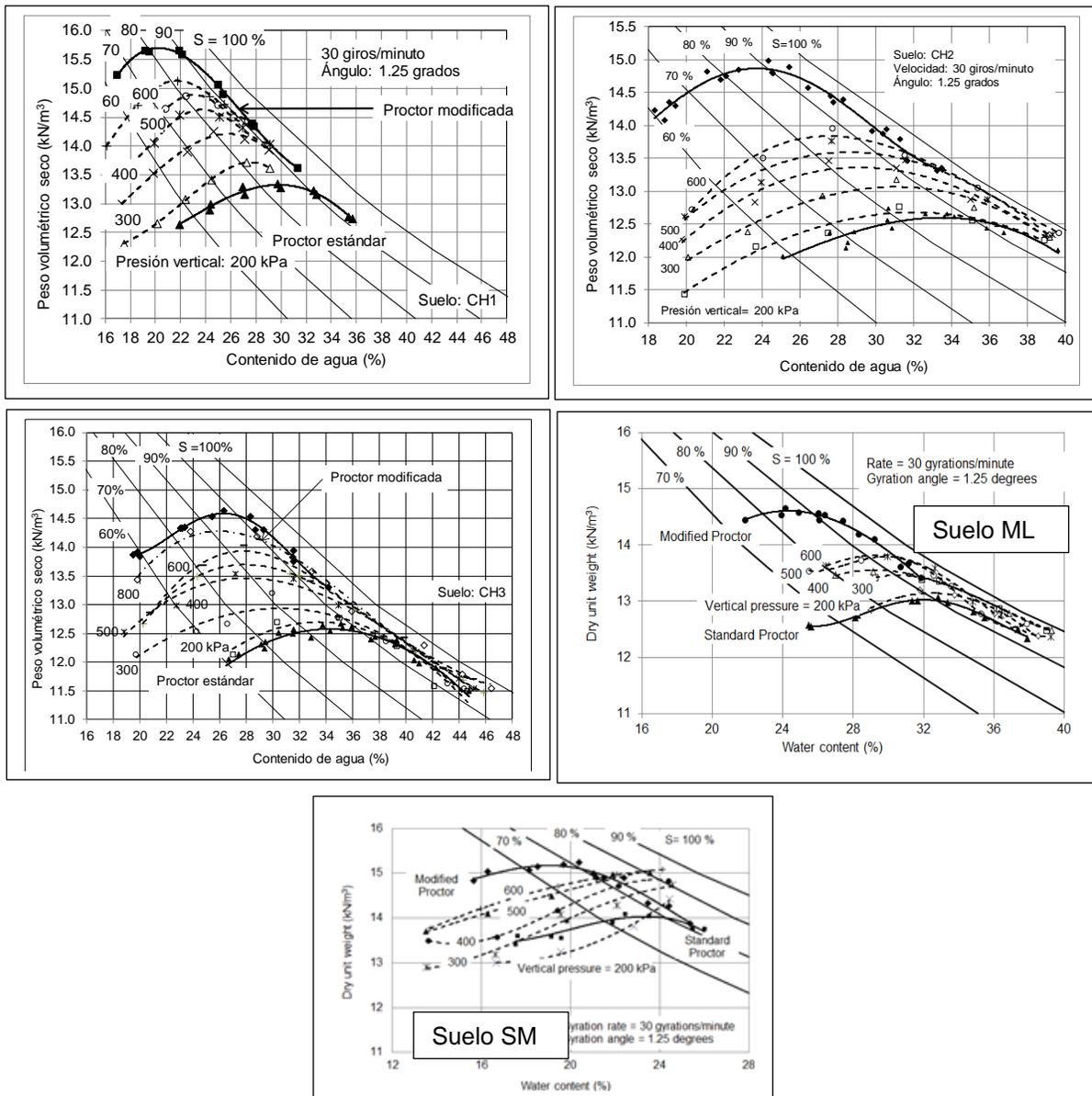


Figura 1.5. Resultados de Pérez et al. (2016)

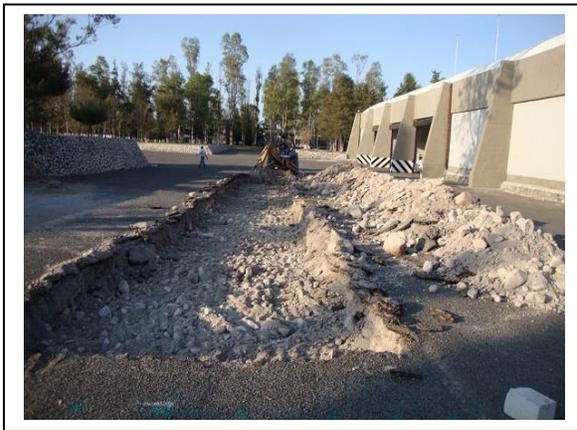
Como se observa en los estudios anteriores, cada uno de los investigadores ha determinado la curva de compactación controlando o fijando un cierto número de variables. Pero a la fecha no hay un procedimiento que indique cómo debe determinarse la curva de compactación utilizado el equipo giratorio.

En este documento se fija un procedimiento para determinar la curva de compactación Proctor estándar de varios suelos.

2 Materiales y procedimientos de prueba

2.1. Muestreo de los materiales de prueba

En el estudio se utilizaron distintos materiales. Algunos suelos fueron muestreados de forma alterada en el estado de Querétaro y otros en otros estados de la República Mexicana. La Figura 2.1 muestra tres de los materiales estudiados.



(a) Material de la base del HVS



(b) Material de Veracruz



(c) Banco de materiales Los Cues

Figura 2.1. Fotografías de tres de los suelos estudiados

2.2. Preparación de los suelos y determinación de propiedades índice

Los materiales estudiados contenían material con tamaño superior a la malla No. 4 (4.75 mm), pero en el proyecto solo se utilizó el material que pasó dicha malla.

Después del cribado por la malla No. 4, los materiales se secaron al aire, se cuartearon y se almacenaron. Para determinar las propiedades índice se utilizaron los procedimientos listados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Procedimientos utilizados para evaluar propiedades índice

| Designación de la norma | Nombre |
|--------------------------------|--|
| ASTM D 1140-17 | Determinación de la cantidad de suelo más fino que la malla No. 200. |
| ASTM C136-14 | Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. |
| ASTM D4318-10 | Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. |
| ASTM D854-14 | Determinación de la gravedad específica del suelo |

2.3. Determinación de la curva de compactación Proctor estándar

El procedimiento resumido para determinación de la curva de compactación Proctor estándar con el método tradicional (para suelos que pasan la malla 4) es como sigue (ASTM D698-12):

- Se pesan muestras de 1900 gramos. Esta cantidad de suelo no es la que indica la norma, sin embargo, la experiencia indica que 1900 g de suelo son suficientes para cada punto de prueba.
- Se preparan al menos cuatro especímenes (preferentemente cinco) que tengan contenidos de agua de tal manera que de ellos se obtenga el contenido de agua óptimo.
- El suelo ya mezclado con el agua de compactación se almacena por un periodo de 12 a 16 horas.

Compactación. Después del curado, cada espécimen debe ser compactado como sigue:

- Se determina y registra la masa del molde o molde y placa base.
- Se ensambla el molde.
- El molde deberá descansar sobre una superficie rígida y uniforme, tal como un cilindro o cubo de concreto con una masa no menor a 91 kg.
- Se compacta el espécimen en tres capas. Se coloca el suelo suelto de la primera capa en el molde y se dispersa en una capa de espesor uniforme.

Se compacta con 25 golpes de un pisón cuya masa es 2.5 kg; la altura de caída es de 305 mm.

- Se procede a compactar la segunda y tercera capa de suelo.
- Después de compactar la tercera capa, se quita el collarín. Se utiliza un cuchillo para remover el suelo adyacente al collarín para aflojar el suelo y así evitar extrusión del mismo.
- Se enrasa el espécimen compactado para obtener una superficie plana con respecto a la parte superior del molde.
- Se determine y se registra la masa del espécimen y molde.
- Se retira el material del molde para determinar el contenido de agua usando todo el espécimen (preferible) o una porción representativa.
- Se grafica el peso volumétrico seco y el contenido de agua de cada espécimen de prueba. Si no se obtiene el modelo deseado, se adicionan especímenes hasta donde se requiera. Generalmente, un valor de contenido de agua en la rama húmeda es suficiente para definir el peso volumétrico seco máximo.

2.4. Determinación de la curva de compactación Proctor estándar utilizando el equipo giratorio

Para determinar la curva de compactación con equipo giratorio se siguieron los pasos que a continuación se mencionan:

- Con la fracción de suelo que pasa la malla No. 4 se preparan como mínimo cinco especímenes de 1 kg.
- A cada espécimen de ensayo se le agrega agua en cantidades diferentes, de tal forma que de ellos se obtenga el contenido de agua óptimo.
- Se mezcla bien cada espécimen para asegurar una distribución adecuada del agua y se coloca en una bolsa de polietileno permitiéndole reposar de 12 a 16 horas.
- Previo a la compactación, se prepara el equipo giratorio. Se abre la válvula que alimenta al compactador giratorio de aire comprimido (Figura 2.2).
- Se enciende el equipo giratorio y se configuran las variables de compactación (Figura 2.2).



Figura 2.2. Configuración de las variables en el equipo giratorio

- Se procede a retirar la tapa del compactador para engrasar el molde (Figura 2.3). En el fondo del molde se coloca un acetato circular para que al final se facilite la extracción del espécimen.



Figura 2.3. Limpieza y engrase del molde

- A continuación, se introduce toda la muestra de suelo en el molde de compactación (Figura 2.4). Con ayuda de una espátula se esparce el material hasta observar una superficie plana sobre la cual se coloca otro acetato circular.
- Se coloca la tapa del compactador y se presiona el botón de comenzar para que inicie el proceso de compactación.

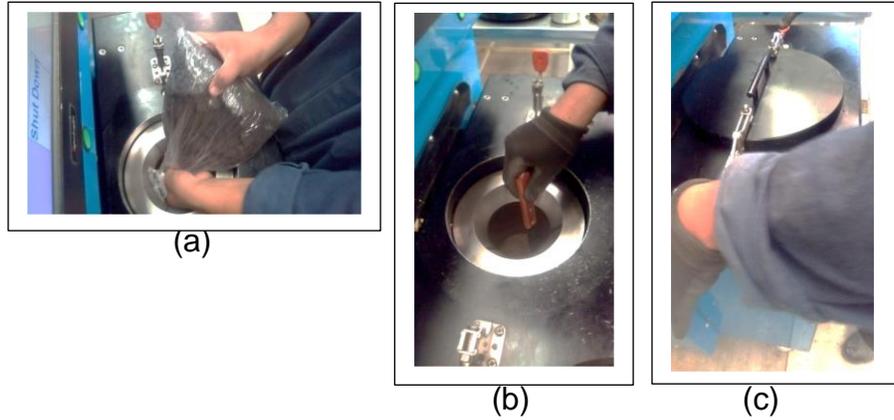


Figura 2.4. Colocación del material en el molde

- Al término del proceso de compactación se retira el espécimen compactado del equipo y se determina su peso y dimensiones (Figura 2.5).

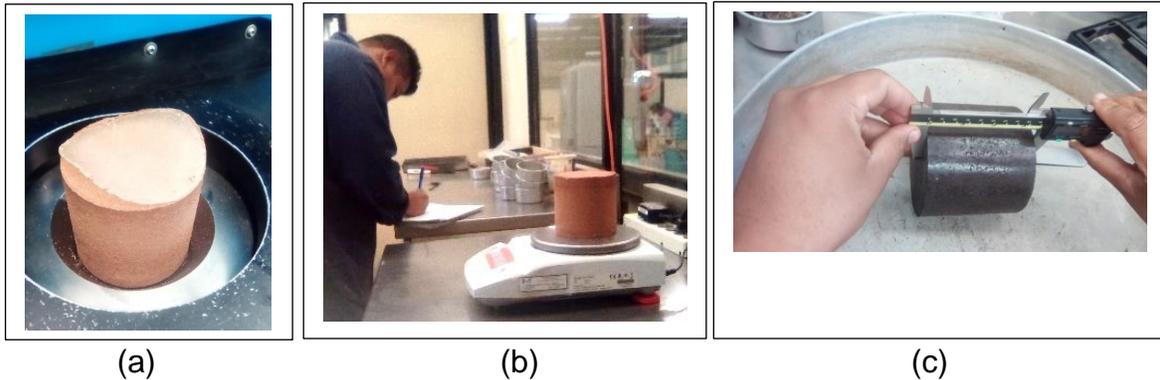


Figura 2.5. Extracción y registro de peso y dimensiones de la muestra compactada

- Para finalizar el proceso, la muestra se disgrega y se toman tres testigos de suelo determinar el contenido de agua.
- Una vez obtenidos los datos, se grafican las curvas de compactación.

3 Resultados y análisis

3.1. Propiedades índice

Las propiedades y las clasificaciones de los suelos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades de los suelos en estudio

| Suelo | Límites de consistencia | | Pasa 200 (%) | Gs | Clas. SUCS |
|---------------------------------|-------------------------|--------|--------------|------|------------|
| | LL (%) | LP (%) | | | |
| Arcilla del IMT | 66 | 41 | 86.0 | 2.61 | CH |
| Arcilla de La gasera, Querétaro | 91 | 32 | 96.0 | 2.53 | CH |
| Arcilla del Lago La Venta | 69 | 45 | 87.0 | 2.56 | CH |
| Suelo CL | 33 | 22 | 78.86 | 2.56 | CL |
| Suelo todo en uno | 38 | 15 | 57.24 | 2.62 | CL |
| La Galera, Querétaro | 59 | 26 | 89.60 | 2.68 | MH |
| Suelo de Guadalajara | 64 | 30 | 63.7 | 2.4 | MH |
| Suelo 2 de Santa Lucia | 61 | 38 | 72.84 | 2.51 | MH |
| Suelo 3 de Santa Lucia | 87 | 58 | 84.68 | 2.50 | MH |
| Banco Misha, Querétaro | 44 | 11 | 87.0 | 2.74 | ML |
| Suelo 1 de Santa Lucia | 36 | 26 | 63.90 | 2.25 | ML |
| Suelo de Veracruz | 23 | 8 | 31.0 | 2.85 | SC |
| Suelo de la ciclovía | NP | NP | 28.52 | 2.57 | SM |
| Suelo de San José | NP | NP | 13.30 | 2.43 | SM |
| Suelo de la base del HVS | 51 | 30 | 43.70 | 2.62 | SM |
| Suelo Conín 08 | NP | NP | 32.90 | 2.37 | SM |
| Suelo Conín 09 | NP | NP | 32.20 | 2.48 | SM |
| Banco Los Cues, Querétaro | NP | NP | 37.0 | 2.52 | SM |

NOTA: NP=No plástico; CH= Arcilla de alta compresibilidad; MH= Limo de alta compresibilidad; ML= Limo de baja compresibilidad; SM= Arena limosa; SC= arena arcillosa; LL= Límite líquido; LP= Límite plástico; Gs = Peso específico relativo de los sólidos.

3.2. Determinación de la curva de compactación en equipo giratorio variando la presión vertical

Después de obtener las curvas de compactación con el método tradicional, el objetivo era encontrar la curva de compactación con equipo giratorio. Para esto, la velocidad de giro, el ángulo de giro, y el número de giros, se establecieron en valores de 30 giros por minuto, 1.25 grados y 200 giros. La presión vertical se fue

incrementando hasta que la curva de compactación igualó la curva obtenida con el método tradicional. Las Figuras 3.1 y 3.2 son dos ejemplos de las curvas obtenidas al ir variando la presión vertical.

Cabe señalar que la primera curva de compactación se determinaba con una presión vertical de 400 kPa, y con la curva obtenida se decidía si la presión vertical se incrementaba o se reducía para la siguiente curva. El procedimiento se repitió las veces necesarias para encontrar presión vertical correcta.

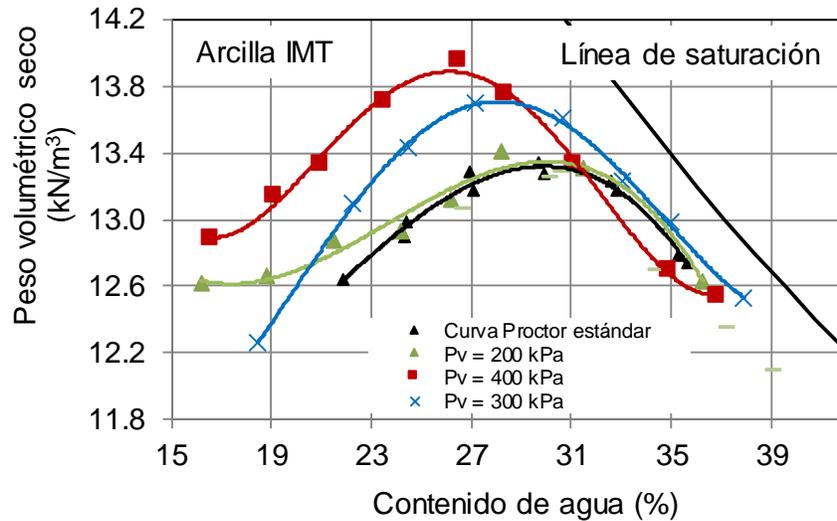


Figura 3.1. Curvas de compactación de la arcilla IMT. Curva Proctor estándar y las curvas obtenidas con equipo giratorio

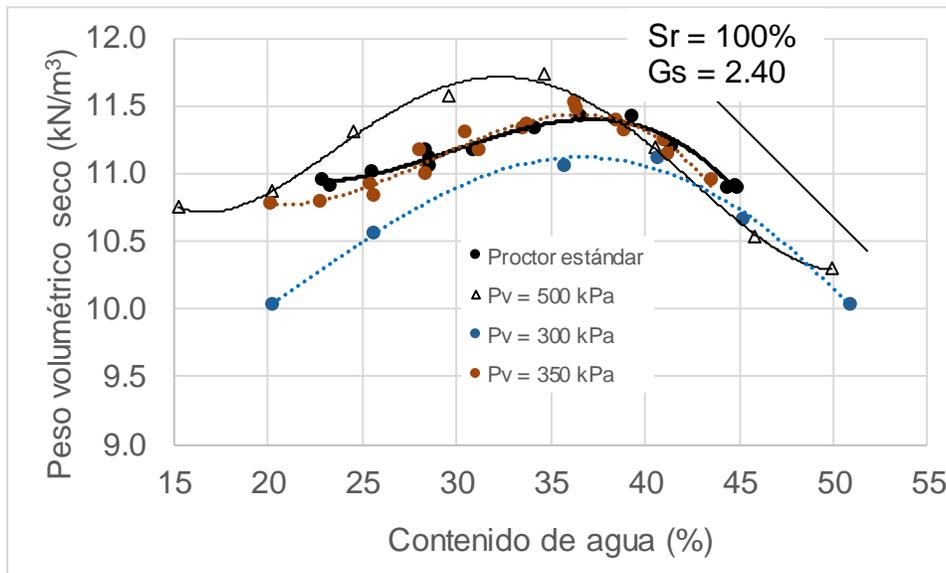


Figura 3.2. Curvas de compactación del suelo de Guadalajara. Curva Proctor estándar y las curvas obtenidas con equipo giratorio

3.3. Curvas de compactación obtenidas en equipo giratorio

Las Figuras 3.3 a 3.20 muestran los resultados de las curvas de compactación con equipo giratorio que igualaron a la curva de compactación Proctor estándar.

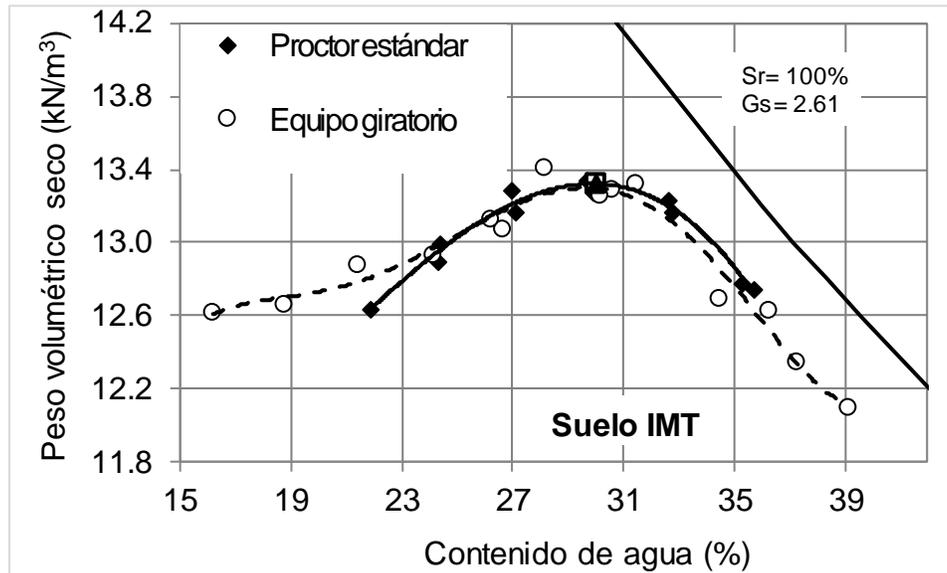


Figura 3.3. Curvas de compactación de la arcilla IMT. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

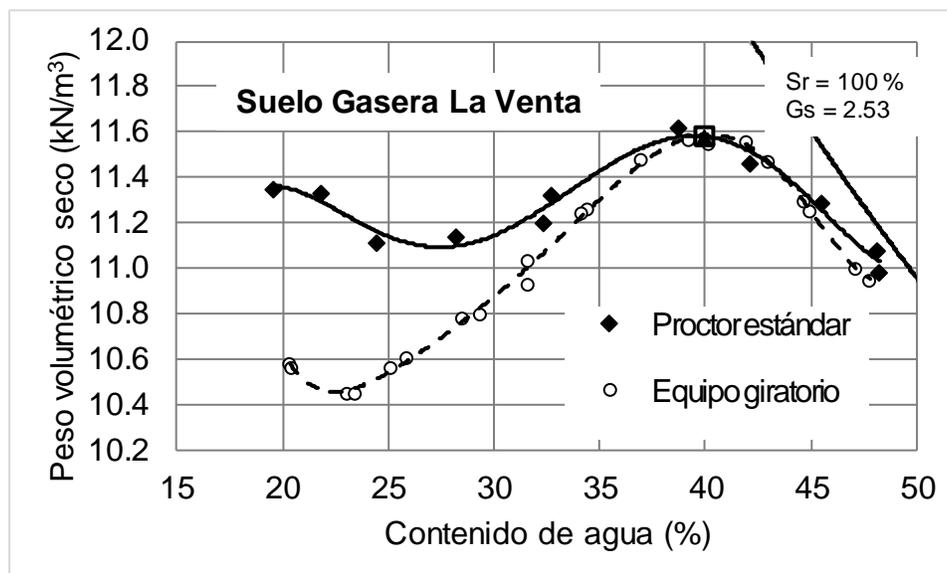


Figura 3.4. Curvas de compactación de la arcilla de La Gasera. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

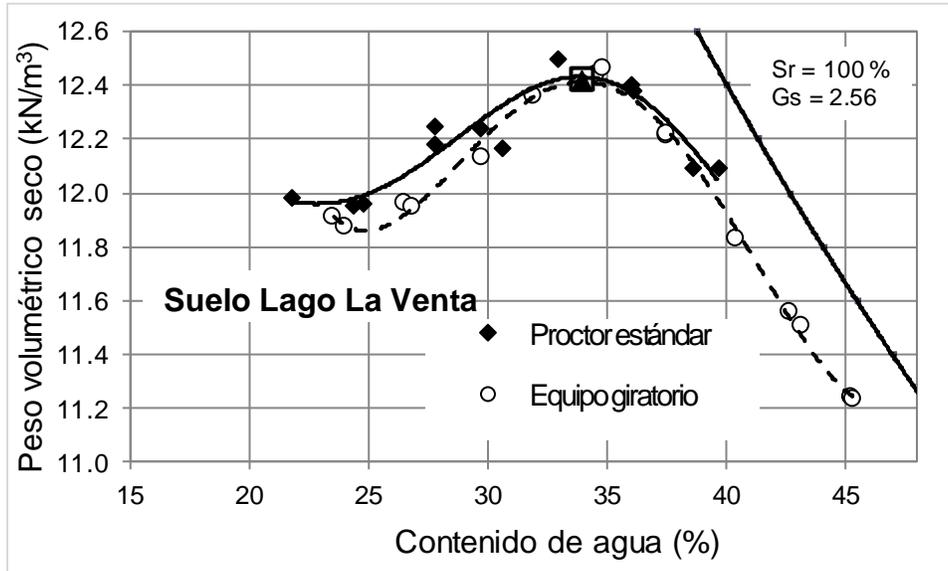


Figura 3.5. Curvas de compactación de la arcilla del lago la Venta. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

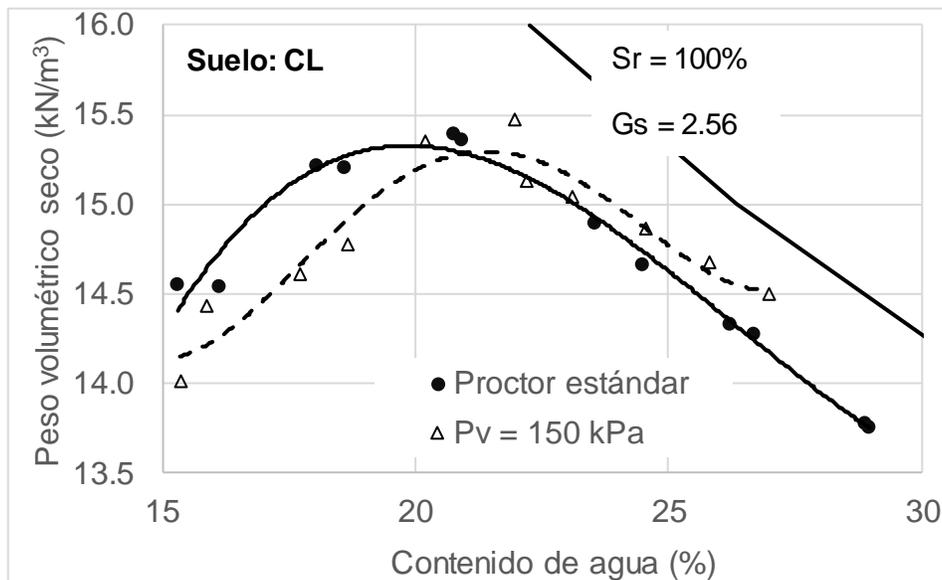


Figura 3.6. Curvas de compactación del suelo CL. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

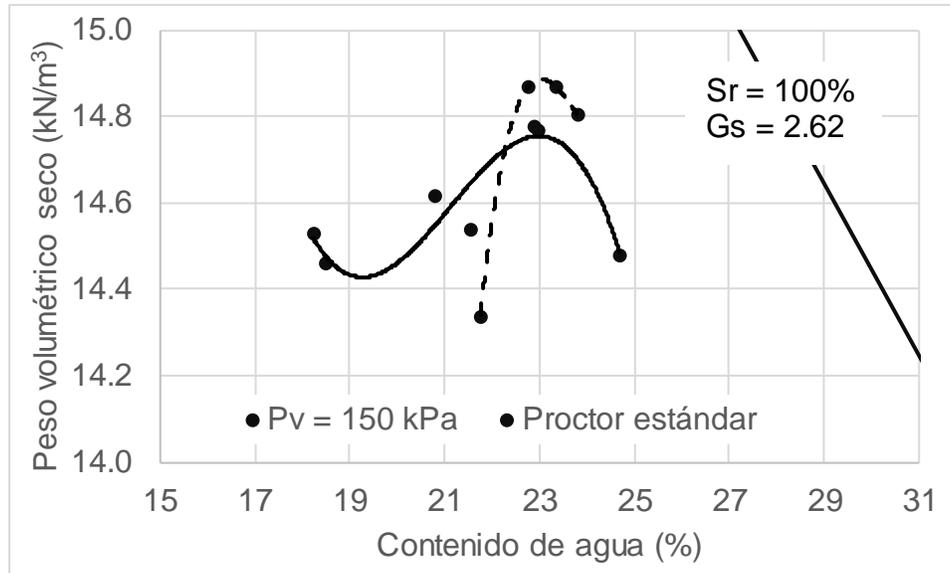


Figura 3.7. Curvas de compactación del suelo todo en uno. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

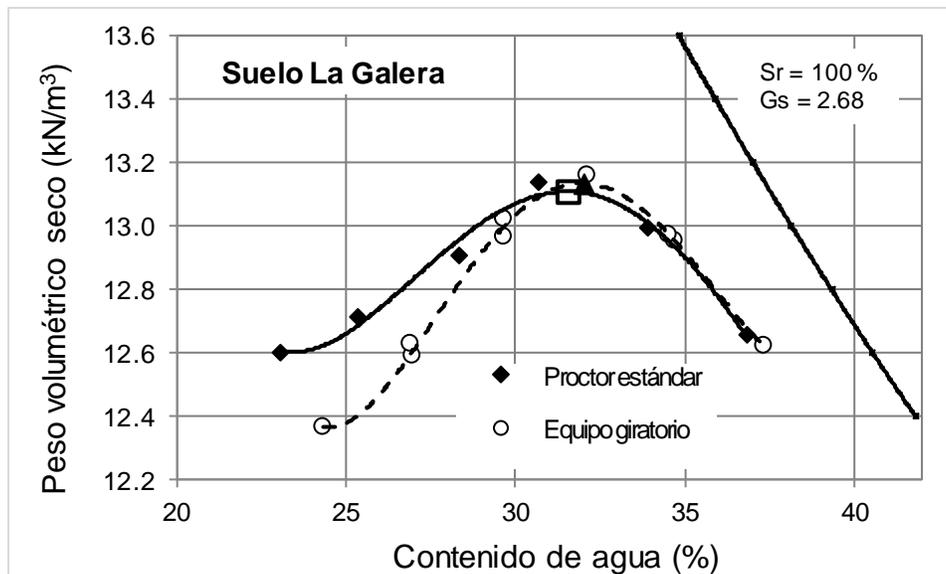


Figura 3.8. Curvas de compactación del suelo de la Galera. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

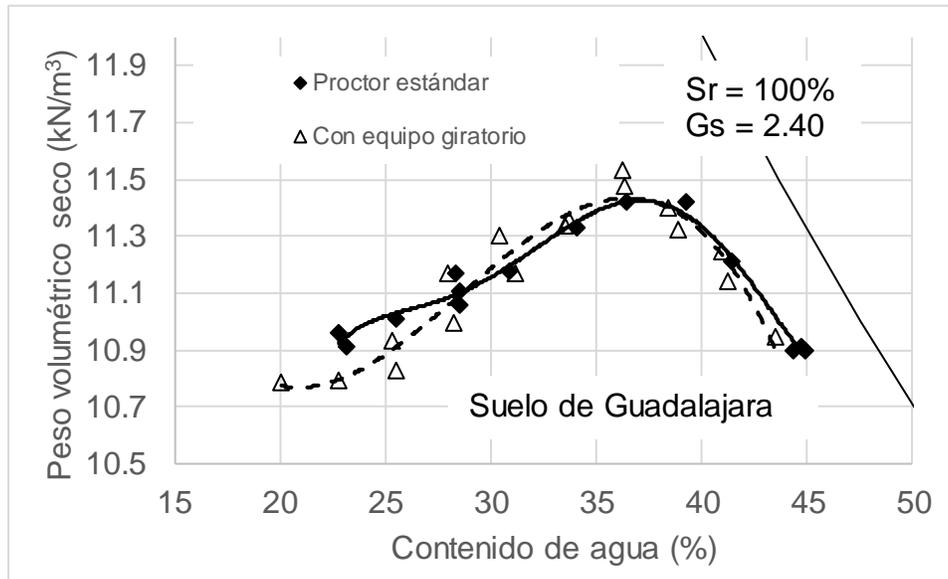


Figura 3.9. Curvas de compactación del suelo de Guadalajara. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

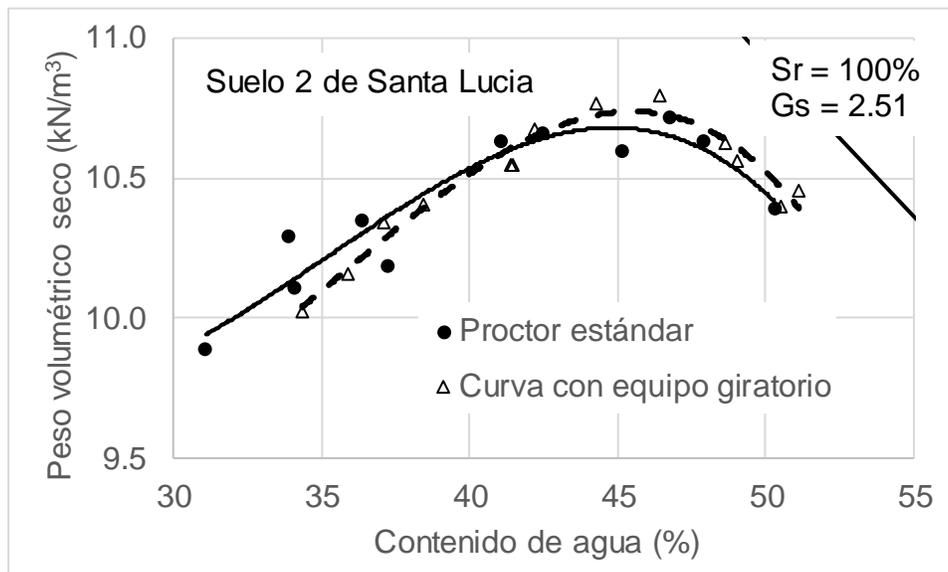


Figura 3.10. Curvas de compactación del suelo 2 de Santa Lucia. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

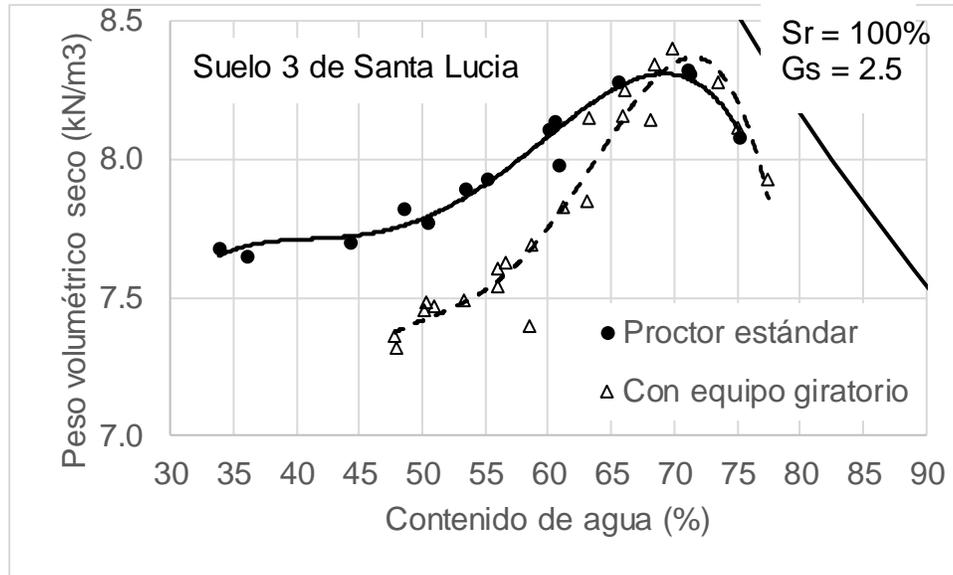


Figura 3.11. Curvas de compactación del suelo 3 de Santa Lucia. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

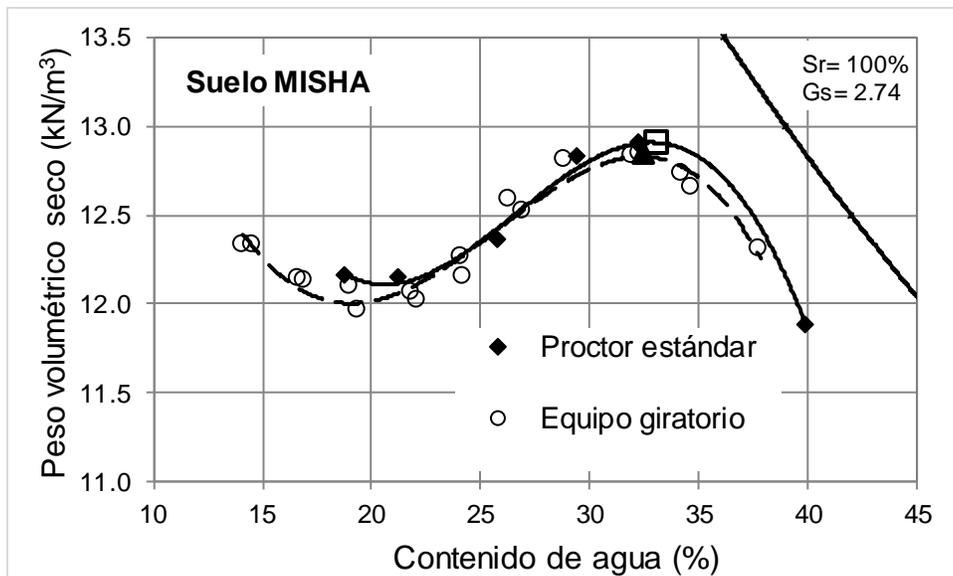


Figura 3.12. Curvas de compactación del suelo de Misha. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

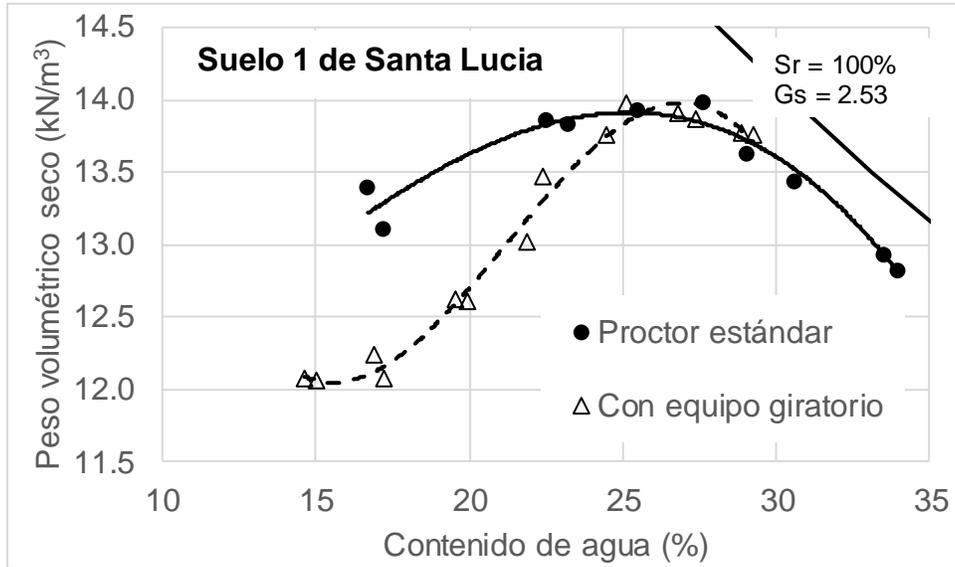


Figura 3.13. Curvas de compactación del suelo 1 de Santa Lucia. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

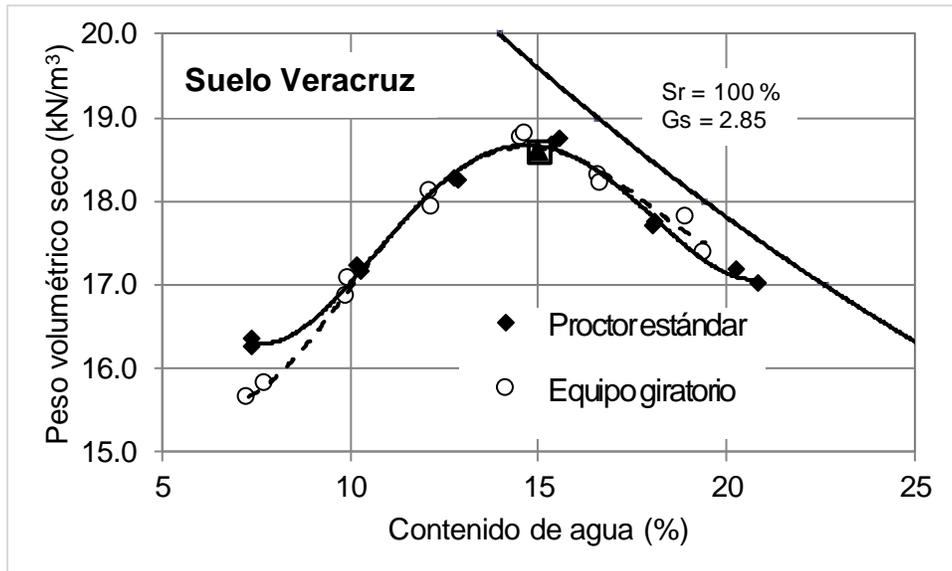


Figura 3.14. Curvas de compactación del suelo de Veracruz. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

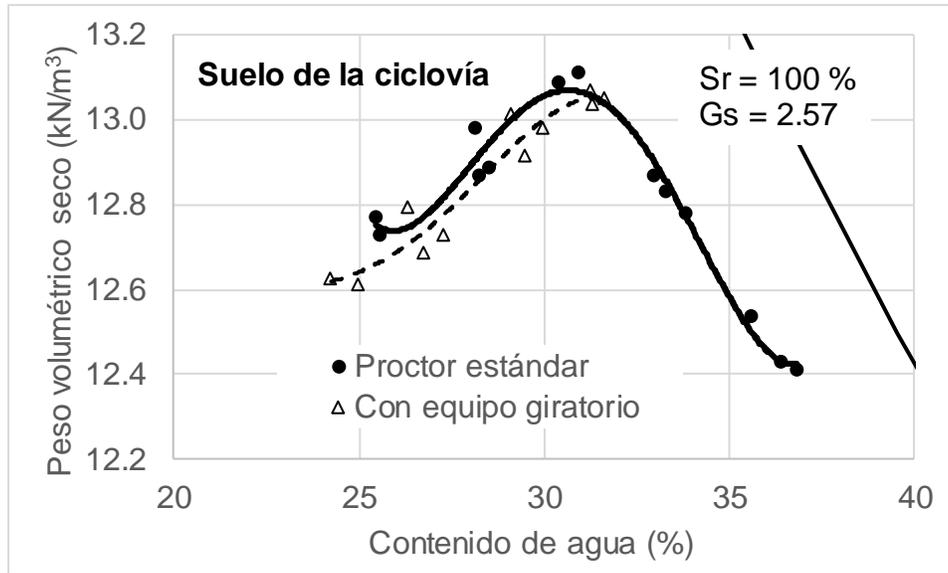


Figura 3.15. Curvas de compactación del suelo de la ciclovía. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

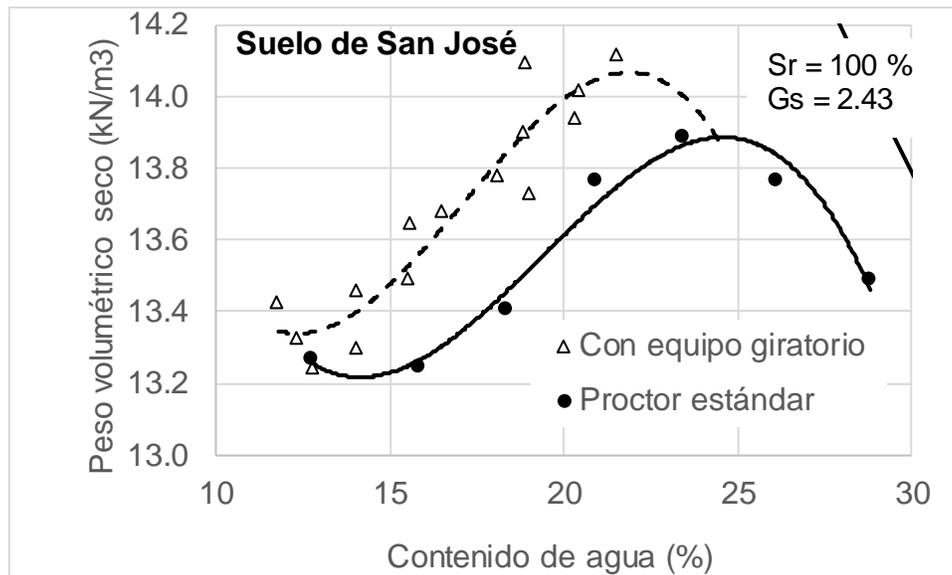


Figura 3.16. Curvas de compactación del suelo de San José. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

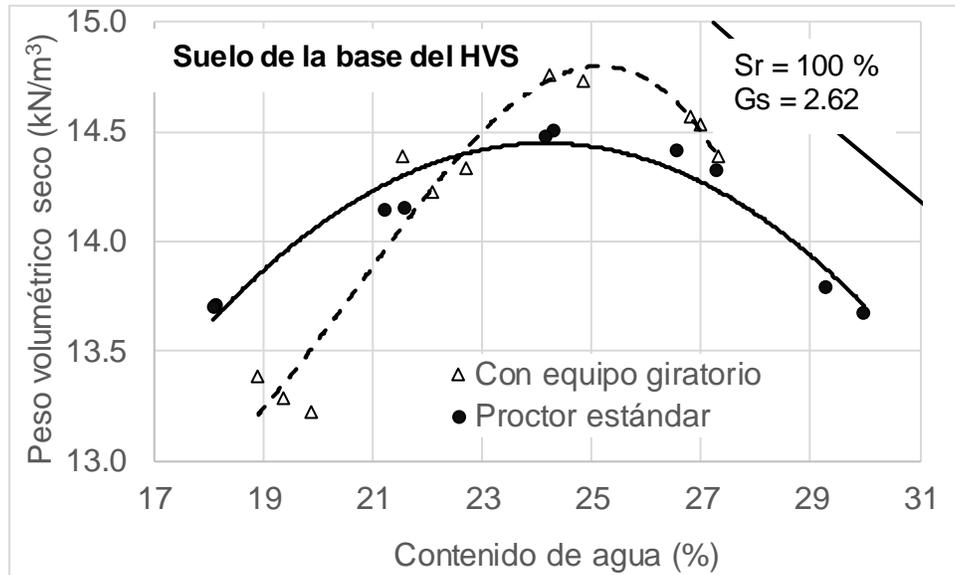


Figura 3.17. Curvas de compactación del suelo de la base del HVS. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

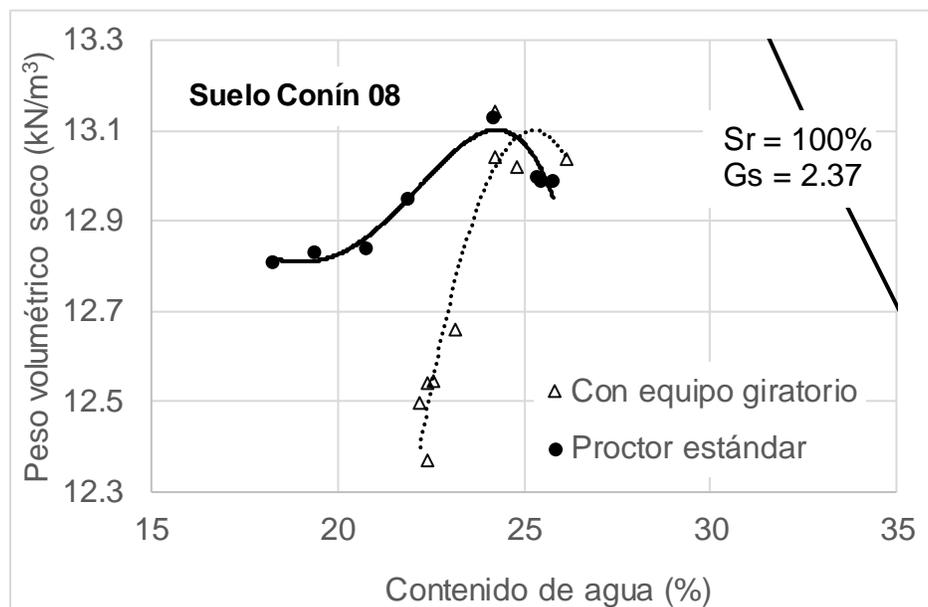


Figura 3.18. Curvas de compactación del suelo Conín 08. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

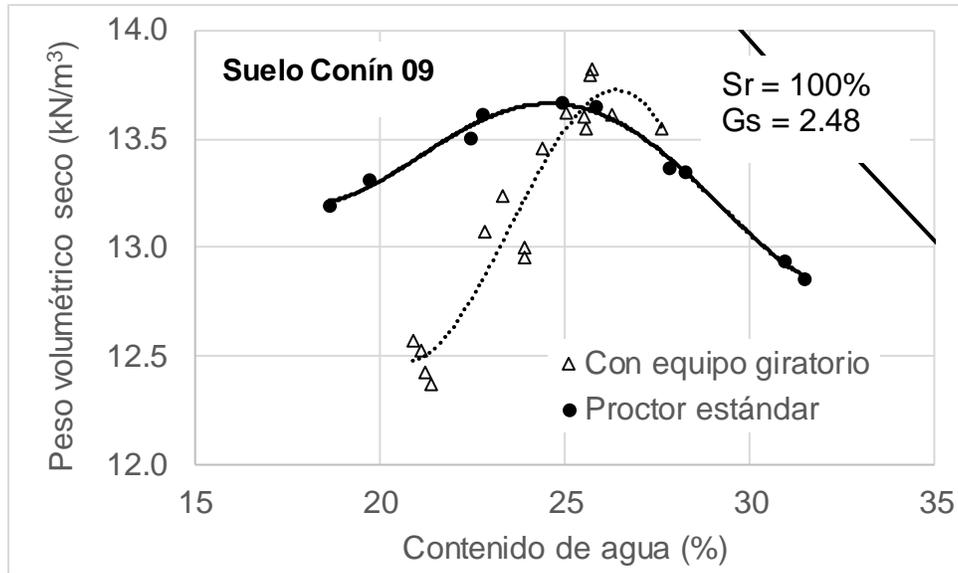


Figura 3.19. Curvas de compactación del suelo Conín 09. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

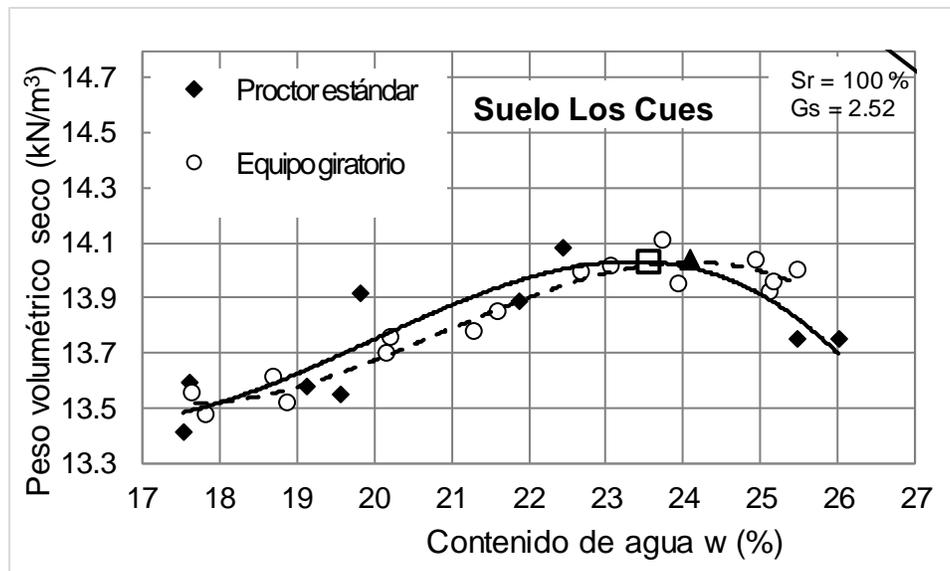


Figura 3.20. Curvas de compactación del suelo de Los Cues. Curva Proctor estándar y la curva obtenida con equipo giratorio

Como se observa en las Figura 3.3 a 3.20, para los diferentes suelos se requieren presiones verticales diferentes para igualar la curva de compactación Proctor estándar.

En la Tabla 3.2 se resumen las propiedades de los suelos y la presión vertical requerida para alcanzar los pesos volumétricos secos de la curva de compactación Proctor estándar.

Tabla 3.2. Resumen de variables utilizadas en equipo giratorio y propiedades de los suelos

| Suelo | IP (%) | Pasa 200 (%) | Clas. SUCS | Variables del equipo giratorio | | | |
|---------------------------------|--------|--------------|------------|--------------------------------|--------------------------|--------------|------------------------|
| | | | | Ángulo de giro (grados) | Velocidad (giros/minuto) | No. de giros | Presión vertical (kPa) |
| Arcilla del IMT | 25 | 86.0 | CH | 1.25 | 30 | 200 | 200 |
| Arcilla de La gasera, Querétaro | 59 | 96.0 | CH | 1.25 | 30 | 200 | 200 |
| Arcilla del Lago La Venta | 24 | 87.0 | CH | 1.25 | 30 | 200 | 400 |
| Suelo CL | 11 | 78.86 | CL | 1.25 | 30 | 200 | 150 |
| Suelo todo en uno | 23 | 57.24 | CL | 1.25 | 30 | 200 | 150 |
| La Galera, Querétaro | 33 | 89.60 | MH | 1.25 | 30 | 200 | 350 |
| Suelo de Guadalajara | 34 | 63.7 | MH | 1.25 | 30 | 200 | 350 |
| Suelo 2 de Santa Lucia | 23 | 72.84 | MH | 1.25 | 30 | 200 | 310 |
| Suelo 3 de Santa Lucia | 29 | 84.68 | MH | 1.25 | 30 | 200 | 400 |
| Banco Misha, Querétaro | 33 | 87.0 | ML | 1.25 | 30 | 200 | 400 |
| Suelo 1 de Santa Lucia | 10 | 63.90 | ML | 1.25 | 30 | 200 | 150 |
| Suelo de Veracruz | 15 | 31.0 | SC | 1.25 | 30 | 200 | 200 |
| Suelo de la ciclovía | NP | 28.52 | SM | 1.25 | 30 | 200 | 250 |
| Suelo de San José | NP | 13.30 | SM | 1.25 | 30 | 200 | 100 |
| Suelo de la base del HVS | 21 | 43.70 | SM | 1.25 | 30 | 200 | 50 |
| Suelo Conín 08 | NP | 32.90 | SM | 1.25 | 30 | 200 | 50 |
| Suelo Conín 09 | NP | 32.20 | SM | 1.25 | 30 | 200 | 80 |
| Banco Los Cues, Querétaro | NP | 37.0 | SM | 1.25 | 30 | 200 | 550 |

Las curvas resultantes indican que, para algunos suelos, la curva obtenida con el equipo giratorio es semejante a la curva obtenida con el método tradicional. Sin embargo, para los suelos no plásticos, la curva de compactación obtenida con equipo giratorio difiere en la rama seca. Tanto en el óptimo como en la rama húmeda, ambos métodos proporcionan resultados similares para la mayor parte de los suelos estudiados.

Con los suelos drenantes (suelos no plásticos), se debe tener cuidado al determinar la curva de compactación con equipo giratorio, ya que es precisamente en el punto óptimo en donde el agua empieza a drenar y el peso volumétrico seco tiende a incrementarse por la disminución en contenido de agua. Por esto, es difícil compactar muestras por arriba del contenido de agua óptimo, lo que dificulta la definición de la rama húmeda de la curva de compactación.

Asimismo, en suelos drenantes, la curva de compactación obtenida en equipo giratorio difiere de la curva de compactación Proctor obtenida con método tradicional. Ejemplo de estos suelos fueron los de Conín 08, Conín 09, San José, material todo en uno, etc.

En general, de acuerdo con los resultados anteriores, para suelos tipo CH y CL, la curva de compactación Proctor estándar podría determinarse con una presión vertical entre 150 y 200 kPa. Para suelos tipo SM, la presión que proporciona la curva de compactación Proctor estándar es de aproximadamente 100 kPa. Para suelos tipo MH y MH la presión vertical está entre 350 y 400 kPa.

Cabe señalar que las presiones verticales serían las anteriores, sin embargo, se deben mantener constantes las otras variables que se mencionaron en el procedimiento.

4 Conclusiones

En este documento se presenta un estudio sobre la determinación de la curva de compactación Proctor estándar utilizando el equipo giratorio. Algunas de las conclusiones que se desprenden de este trabajo son las siguientes:

- La curva de compactación sí se puede obtener con equipo giratorio para algunos suelos.
- Para determinar la curva de compactación Proctor estándar se pueden preparar 1000 gramos de suelo para cada punto. A esta cantidad de suelo se le agregarán diferentes cantidades de agua de tal manera que se obtenga el contenido de agua óptimo de compactación.
- Para la determinación de las curvas de este estudio, se fijaron las siguientes variables en el equipo giratorio: La velocidad de giro, número de giros y ángulo de giro fueron 30 giros por minuto, 200 giros y 1.25 grados, respectivamente.
- Las curvas del equipo giratorio que igualaron la Proctor estándar se obtuvieron con diferentes presiones verticales. En general, la curva de compactación Proctor estándar de suelos CH y CL se puede obtener con una presión vertical de entre 150 y 200 kPa; los suelos SM con 100 kPa y los suelos tipo MH y ML con 350 o 400 kPa.
- Las curvas de compactación con ambos métodos presentan diferencias en la rama seca para algunos suelos. Para la rama húmeda, ambos métodos proporcionan resultados similares, excepto para suelos drenantes.
- Es difícil obtener la curva de compactación con equipo giratorio que iguale a la Proctor estándar con método tradicional, esto para el caso de suelos arenosos como el caso de suelos como Conín 08, Conín 09, San José, etc.
- Para suelos drenantes es difícil poder obtener la curva de compactación completa con equipo giratorio, ya que una vez que el suelo tiene un contenido de agua cercano al óptimo, el agua drena durante la compactación. Esto hace que el peso volumétrico seco se incremente, lo que indica que la curva de compactación tienda a subir y no a bajar.

Referencias y Bibliografía

Browne, M. J. (2006). Feasibility of using a gyratory compactor to determine compaction characteristics of soil. Tesis de maestría. Universidad Estatal de Montan. Noviembre 2006.

Camacho, T. J. F., Reyes, O. O. J. y Méndez, G. D. F. (2007). Ensayo de compactación giratoria en suelos como una alternativa al ensayo de compactación Próctor. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 17-2. Pp. 61-81. Diciembre de 2007.

Pérez, G. N., Garnica, A. P., Flores, M. B., Mendoza, P. I., y Reyes, R. M. (2012). Comportamiento de suelos finos compactados con altos niveles de esfuerzo cortante. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica No. 350.

Perez, N., Garnica, P., Mendoza, I., and Reyes, M. (2013). Behavior of fine-grained soils compacted with high shear stresses. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris 2013.

Perez, G. N., Garnica, A. P., Fredlund, D., Reyes, M.A., García, C. M., and Pérez, L. R. (2016). Compaction and mechanical properties of soils compacted in the gyratory compactor. Revista Infraestructura Vial. Vol. 18. Número. 31, Julio 2016. Pp. 20-29.

Mclachlan, R. y Bagshaw, S.A. (2017). Standardisation of laboratory compaction energies. NZ Transportation Agency Research Report 628. October 2017.

Khaled, Z. S. M., Abed, A. H., Nsayif, T. S. (2017). Significance of using superpave gyratory compactor to simulate field compaction of fine grained soil. Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES). Vol. 20, No. 3, 2017. Pp. 641-646.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>