ISSN 0188-7297





Certificación ISO 9001:2008 ‡

# Comportamiento de suelos finos compactados con altos niveles de esfuerzo cortante

Natalia Pérez García Paul Garnica Anguas Blanca E. Flores Mejía Itzel N. Mendoza Pérez Miguel A. Reyes Rodríguez

Publicación Técnica No. 350 Sanfandila, Qro, 2012

#### SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

#### INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Comportamiento de suelos finos compactados con altos niveles de esfuerzo cortante

> Publicación Técnica No. 350 Sanfandila, Qro, 2011

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, Itzel N. Mendoza Pérez, Blanca Esthela Flores Mejía e Ing. Miguel A. Reyes Rodríguez.

Se agradece la colaboración en esta investigación del Ing. Jesús Daniel Rangel Reséndiz.

## Índice

Resumen			v
Abstract			vii
Resumen ejecutivo			ix
1. Introducción			1
	1.1.	Definición del problema	3
	1.2.	Objetivos	4
		1.2.1. Objetivo general	4
		1.2.2. Objetivos específicos	4
	1.3.	Organización del trabajo	4
2.	La co	ompactación de suelos	7
	2.1.	Definición de compactación y factores de los que depende este	
		proceso	7
	2.2.	Procedimiento de compactación por impactos	8
	2.3.	Compactación con equipo giratorio	8
		2.3.1. Descripción del equipo giratorio	9
		2.3.2. Factores que afectan la compactación en el equipo giratorio	18
	2.4.	Resultados reportados en la literatura sobre compactación de	
		suelos con equipo giratorio	20
3.	Mate	riales estudiados y procedimientos de prueba	33
	3.1.	Descripción de los materiales utilizados	33
	3.2.	Procedimientos de prueba	34
		3.2.1. Propiedades índice	34
		3.2.2. Compactación de muestras en el equipo giratorio para	
		determinar las curvas de compactación	34
		3.2.3. Preparación de los especímenes ensavados en compresión	
		simple o módulo de resiliencia con equipo giratorio	38
		3.2.4. Preparación de los especímenes ensayados en compresión	
		simple o módulo de resiliencia (compactados por impactos)	40
		3.2.5. Procedimiento para determinar la resistencia en	
		compresión simple	41
		3.2.6. Procedimiento para determinar el módulo de resiliencia	43
4.	Discu	usión de resultados	45
	4.1.	Propiedades índice	45
	4.2.	Curvas de compactación	45
	4.3.	Curvas de compactación obtenidas en el equipo giratorio v	_
	-	comparadas con las obtenidas con la prueba Proctor	47
		4.3.1. Material de terraplén	47
		4.3.2. Material de subrasante	69
		4.3.3. Comparativa de las propiedades obtenidas con muestras	
		compactadas en forma dinámica v con equipo diratorio	85
4.	Discu 4.1. 4.2. 4.3.	<ul> <li>3.2.5. Procedimiento para determinar la resistencia en compresión simple</li> <li>3.2.6. Procedimiento para determinar el módulo de resiliencia usión de resultados</li> <li>Propiedades índice</li> <li>Curvas de compactación</li> <li>Curvas de compactación obtenidas en el equipo giratorio y comparadas con las obtenidas con la prueba Proctor</li> <li>4.3.1. Material de terraplén</li> <li>4.3.2. Material de subrasante</li> <li>4.3.3. Comparativa de las propiedades obtenidas con muestras compactadas en forma dinámica y con equipo giratorio</li> </ul>	41 43 45 45 45 45 47 47 69 85

4.3.3.1. Compresión simple	85
4.3.3.2. Módulo de resiliencia	87
Conclusiones y Recomendaciones	91
Referencias	93

#### Resumen

Uno de los parámetros utilizados para controlar la compactación de campo (materiales de base, sub-base, subrasante y terraplén), es el peso específico seco máximo obtenido de la prueba Proctor estándar o modificada según sea el caso, sin embargo, aunque estos son los ensayos más utilizados, su mecanismo de densificación está lejos de ser representativo del efecto que producen las pasadas de un rodillo pata de cabra, que es el equipo más eficiente para densificar materiales finos. Este tipo de equipos densifica los materiales con altos niveles de esfuerzo cortante, por lo tanto, actualmente se está proponiendo la utilización del compactador giratorio para determinar las curvas de compactación de laboratorio. Este documento presenta un estudio sobre la compactación con equipo giratorio de dos materiales (una arena limosa y un limo de baja compresibilidad). El estudio consistió en determinar las curvas de compactación en el equipo giratorio y posteriormente compararlas con las curvas obtenidas con las pruebas Proctor estándar y modificada. Adicionalmente se compararon la resistencia en compresión simple y el módulo de resiliencia de probetas preparadas a mismo contenido de agua y peso volumétrico seco pero que se compactaron con los dos métodos de compactación (dinámica y con equipo giratorio).

## Abstract

One of the parameters to carry out the quality control of compacted materials (base, subbase, embankment or subgrade materials) is the maximum dry unit weight obtained from a Proctor standard or modified test, however, even if these testing are the most popular, the mechanism of densification is far from being representative of the effect provided by a sheepsfoot roller which is the equipment to compact fine-grained soils. This type of equipment imparts high shear stresses to the materials in order to compact them. For this reason, the gyratory compactor was put forward to determine the compaction characteristics in laboratory. This document shows a study on this issue. To carry out the research two soils were tested: a silty sand (SM) and silt of low plasticity (ML). The compaction curves were obtained in the gyratory compactor and then they were compared with the ones obtained from standard and modified Proctor tests. In addition the unconfined compression strength and the resilient modulus values of samples compacted in the gyratory compactor with impacts were compared.

## Resumen ejecutivo

La compactación de materiales es uno de los procesos más frecuentes en la construcción de carreteras; su control de calidad rige en gran medida el comportamiento futuro de la estructura.

La forma de controlar la calidad requiere de medir tanto el peso volumétrico seco de campo como el de laboratorio. Para determinar el primero, se requiere llevar a cabo "calas volumétricas", las cuales consisten en hacer un orificio en el material compactado, guardar el material extraído para posteriormente determinar su peso y su contenido de agua. Con estos datos más el peso volumétrico de la arena calibrada, se determina el peso volumétrico seco de campo. Por otro lado, para determinar el peso volumétrico seco máximo de laboratorio existen varios métodos, sin embargo, el más popular es el de impactos. De estos, los procedimientos Proctor son los más comunes.

Los procedimientos Proctor consisten en compactar un material en un molde con un cierto número de impactos con un pisón de masa y altura de caída especificados; esto trata de representar las condiciones de compactación provocada por los equipos de campo. Aún y cuando son los más utilizados, de acuerdo a lo publicado por Ping, et al, (2003), estos no son los más adecuados puesto que el mecanismo de densificación no es similar al producido por los equipos de campo.

Desde hace algunos años, varios investigadores (Ping, et al., 2003; Lee et al., 2005; Browne, 2006; Camacho et al., 2007, etc) han utilizado el compactador giratorio para determinar las curvas de compactación de suelos y materiales granulares. El objetivo de estas investigaciones fue determinar si los materiales compactados con el equipo giratorio representan mejor las condiciones que se obtienen en campo.

En esta investigación se obtuvieron las curvas de compactación con los procedimientos Proctor y con el equipo giratorio. Se estudiaron dos suelos, uno clasificado como arena limosa (SM) y otro como limo de baja compresibilidad (ML). Se determinaron primeramente las curvas de compactación Proctor estándar y la modificada. Después, se obtuvieron los contenidos de agua a los que se compactaron las muestras en el equipo giratorio y se especificaron las variables que se controlaron en el equipo giratorio; éstas fueron las siguientes:

No. de giros: 500 Ángulo de giro: 1.25° Velocidad de aplicación de los giros: 10, 20 y 30 giros/minuto Presión vertical: 200, 300, 400, 500 y 600 kPa Peso del material compactado: 2300 g

Las curvas de compactación Proctor estándar y modificada se determinaron siguiendo los procedimientos ASTM D 698-07e1 y ASTM D1557-09. Para compactar en el equipo giratorio, primeramente se adicionó el agua al material para alcanzar el contenido de agua especificado y se dejó almacenado durante 24 horas para una mejor distribución del agua. Posteriormente, se colocaron 2300 g de suelo húmedo en el molde del equipo giratorio y se programaron las variables que controlaron el proceso de compactación. Al final de la compactación, se obtuvo un archivo con datos como esfuerzo de corte, altura del espécimen, no. de giros, entre otros. Con estos datos se calcularon los pesos volumétricos secos. Para todas las pruebas realizadas se graficaron el número de giros contra peso volumétrico seco y número de giros contra esfuerzo de corte. Para el análisis sólo se tomaron los datos a 100, 200, 300, 400 y 500 giros.

Al comparar las curvas de compactación del limo de baja compresibilidad y de la arena limosa, se observó que existen varias combinaciones de variables que proporcionan el peso volumétrico seco máximo tanto de la prueba Proctor estándar como de la modificada. Además, se determinó el efecto que tiene la velocidad de rotación y la presión vertical aplicada en el peso volumétrico seco y en el esfuerzo de corte. Por ejemplo, ambos parámetros parecen ser independientes de la velocidad de rotación. Sin embargo, la presión vertical sí influye en los dos, es decir, el peso volumétrico seco se incrementa a medida que la presión vertical lo hace y el esfuerzo de corte también se incrementa pero a partir del contenido de agua óptimo (con respecto a la Proctor estándar), parece no tener variación significante.

Por otro lado, para el limo de baja compresibilidad, el esfuerzo de corte se redujo a medida que se incrementó el contenido de agua, pero a partir del óptimo parece mantenerse en un valor constante. Para el caso de la arena limosa, el esfuerzo de corte se incrementa y se redujo bruscamente para contenidos de agua entre 21 y 23%, lo cual no coincidió con el punto óptimo de la curva de compactación Proctor estándar. Por lo tanto, para este tipo de suelo parece existir otro punto óptimo con respecto al esfuerzo de corte.

También se llevaron a cabo comparaciones de la resistencia en compresión simple y del módulo de resiliencia de probetas compactadas en el equipo giratorio y dinámicamente. De los resultados se observó que la resistencia en compresión simple sí depende del método de compactación; el módulo de resiliencia parece depender del método de compactación sólo si se compacta por debajo del contenido de agua óptimo (respecto a la prueba Proctor estándar).

## 1. Introducción

Una de las etapas más importantes en la construcción de una carretera es la compactación de los materiales que conforman la estructura. Por supuesto, la compactación no solamente se utiliza en este tipo de estructuras, sino también en obras como las presas, las plataformas de cimentaciones y, en general, en todas las obras de tierra que requieren la conformación de terraplenes como lo muestra la Figura 1.1.



(a)



(b)



(C)



(d)

**Figura 1.1** Algunas obras en las que se utiliza el proceso de compactación de suelos. (a) Presa, compactación de materiales de la cortina; (b) Pista de prueba del Instituto Mexicano del Transporte, compactación del material de sub-base; (c) Plataforma en donde se alojó la cimentación de varias estructuras; (d) Camino secundario, compactación de materiales estabilizados.

El objetivo final de la compactación es fabricar un material que posea propiedades ingenieriles en términos de resistencia, deformación y permeabilidad. Para un suelo seleccionado, esas propiedades dependen fundamentalmente de tres factores: el contenido de agua que se utilice, la energía de compactación y el método de compactación.

Siendo la compactación esencialmente un proceso constructivo de obra, la energía y el método de compactación quedan impuestos por variables relacionadas por el tipo de compactador que se utilice, su peso y el número de pasadas que se definan en la construcción. La referencia del nivel de compactación que se debe obtener en campo se define, sin embargo, a través de ensayes realizados en laboratorio con procedimientos de ensaye normalizados. En carreteras, los ensayes de compactación más utilizados es el denominado ensaye de compactación Proctor estándar y modificada, en donde un suelo es compactado por impactos con una masa que se deja caer de una cierta altura por un determinado número de veces.

Aunque el ensaye Proctor es el más utilizado en laboratorio, su mecanismo de densificación por impactos está lejos de ser representativo de la compactación obtenida con los equipos de campo. Por ejemplo, el rodillo pata de cabra que se utiliza en la compactación de suelos finos, densifica los suelos finos con altos niveles de esfuerzo cortante. Por otro lado, de estudios de tramos de carreteras construidos en campo se ha encontrado que la densidad que se obtiene es mayor a la que se obtiene de las pruebas de laboratorio (Ping et al., 2003) (Figura 1.2), como consecuencia, si las propiedades mecánicas de diseño se obtienen con especímenes compactados con la prueba Proctor estándar o modificada, el desempeño de la obra puede presentarse de una forma diferente a la esperada.



Contenido de agua ,w (%)

Figura 1.2 Efecto de la energía de compactación en la curva de compactación (campo y laboratorio) (Ping et al., 2003)

Es así que los grupos de investigación en temas relacionados a construcción de carreteras o mecánica de suelos de muchos países, han establecido líneas de trabajo sobre el comportamiento de suelos compactados, y entre los temas que actualmente se estudian está la evaluación de otros métodos de compactación de laboratorio que simulen mejor las condiciones de compactación de campo.

#### 1.1 Definición del problema

En varias investigaciones se ha mostrado que las propiedades de un material compactado dependen en gran medida de la estructura final que se logre en el suelo (Mendoza, 1992; Rico, 1992, Fredlund y Rahardjo, 1993, etc). Entonces, es de esperarse que las propiedades que se obtengan en muestras compactadas mediante impactos (con prueba de compactación Proctor estándar o modificada) y las propiedades que tenga el suelo compactado con los equipos de campo, probablemente serán diferentes. En la compactación de materiales asfálticos por ejemplo, se ha encontrado que la compactación con carga estática y con esfuerzos de corte, produce un proceso de compactación más cercano al que se presenta en la realidad. Para obtener este tipo de compactación en laboratorio, desde hace ya varios años se diseñó un equipo conocido como "compactador

giratorio", en el cual se pueden compactar especímenes de 4 y 6 in de diámetro y con la posibilidad de variar factores tales como: ángulo de giro, número de giros, presión vertical y velocidad de giro (Mokwa et al., 2008).

El equipo mencionado también se ha utilizado para estudiar el comportamiento de suelos y materiales granulares que forman parte de la estructura de una carretera. De hecho, a la fecha se han llevado a cabo estudios tanto de laboratorio como de campo para determinar hasta qué grado el compactador giratorio proporciona condiciones de compactación más cercanas a la realidad, para suelos finos y granulares (Ping et al., 2003; Milberger y Dunlap, 1996).

## 1.2 Objetivos

#### 1.2.1 Objetivo general

Determinar el comportamiento de suelos finos compactados con altos niveles de esfuerzo cortante.

#### 1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar si el óptimo de compactación (de la prueba Proctor estándar y modificada) de un suelo corresponde a la condición de esfuerzo de corte mínimo.
- Determinar las condiciones de ensaye en el compactador giratorio, en términos de ángulo de giro y presión vertical, que permiten obtener energías de compactación similares a las obtenidas en los ensayes Proctor convencionales.
- ✓ Determinar si la resistencia a la compresión simple y el módulo de resiliencia de un suelo compactado con alto nivel de esfuerzo cortante son significativamente diferentes de las obtenidas en suelos densificados por impactos, a mismos valores de contenido de agua y peso volumétrico seco.
- Determinar si las propiedades ingenieriles de un suelo compactado en condiciones de alto nivel de esfuerzo cortante son más adecuadas para diseño de terracerías y terraplenes.

## 1.3 Organización del trabajo

La organización del trabajo es la siguiente:

En el capítulo 1 se presenta una introducción al trabajo así como la definición del problema, el objetivo general y los objetivos específicos.

El capítulo 2 está dedicado a la presentación de los antecedentes sobre la compactación de suelos con equipo giratorio; se presentan resultados obtenidos en otros estudios reportados en la literatura. Además, se mencionan los factores

que afectan la compactación de materiales compactados utilizando el mismo equipo.

En el capítulo 3 se resumen los procedimientos de laboratorio seguidos en el desarrollo del trabajo de investigación. Se pone especial énfasis en el procedimiento de compactación con equipo giratorio y los procedimientos para determinar la resistencia en compresión simple y el módulo de resiliencia. En este mismo capítulo se describen a detalle los equipos más relevantes que se utilizaron en el estudio.

Los resultados se presentan en el capítulo 4. Éstos consisten de gráficas en las que se muestran cómo varían algunas propiedades de las muestras durante el proceso de compactación por efecto de amasado y presión estática. También se llevan a cabo comparaciones de propiedades como resistencia en compresión simple y módulo de resiliencia de probetas compactadas en equipo giratorio y por medio de impactos.

Finalmente, se enumeran las conclusiones y recomendaciones derivadas del trabajo realizado.

## 2. La compactación de suelos

Puesto que el tema sobre compactación de suelos se aborda en muchos libros de mecánica de suelos y de vías terrestres, en esta sección sólo se tratarán de forma somera los factores de los que depende la compactación, los procedimientos para obtener las características de compactación y una discusión sobre aspectos relacionados a la compactación con equipo giratorio.

#### 2.1 Definición de compactación y factores de los que depende este proceso

La compactación de suelos es un proceso mecánico mediante el cual se buscan mejorar las propiedades de los suelos entre las que se pueden mencionar la resistencia al esfuerzo cortante, la compresibilidad, la permeabilidad, entre otros (Rico y del Castillo, 1988).

Este proceso depende de varios factores, algunos de ellos son: el contenido de agua, el método de compactación (estático, dinámico, por amasado, etc.), la energía de compactación, el tipo de suelo, etc (Rico y del Castillo, 1988).

**Con respecto a la energía de compactación**: las curvas de compactación muestran un peso volumétrico seco máximo que se va incrementando a medida que la energía de compactación se incrementa, lo opuesto sucede con el contenido de agua óptimo, que se reduce a medida que la energía de compactación se incrementa (Rico y del Castillo, 1988).

**Con respecto al contenido de agua**, el peso volumétrico seco se va incrementando a medida que el contenido de agua se incrementa, pero el incremento en el peso volumétrico no es infinito sino que existe un umbral para el cual el peso volumétrico disminuye.

*El tipo de suelo* es otro de los factores de gran importancia. Cuando los suelos son granulares, los pesos volumétricos secos que se alcanzan son mucho mayores con respecto a los de los suelos finos. Además, el contenido de agua óptimo para suelos granulares depende de la cantidad de suelo fino que contenga. Si el porcentaje de finos es muy bajo, el contenido de agua óptimo también es bajo comparado con el que se obtiene en un suelo fino como una arcilla. Asimismo, el tipo de suelo también establece el tipo de equipo que se utilizará en campo para su compactación. Por ejemplo, para la compactación se materiales granulares se recomienda más el uso de equipos vibratorios y para el caso de suelos finos se utiliza más el rodillo pata de cabra (Rico y del Castillo, 1988).

*El método de compactación* también es muy importante ya que la estructura que adquiere el suelo compactado depende del método utilizado. Además, se ha demostrado que el comportamiento del suelo compactado también depende de la estructura que adquiere (Mendoza, 1992; Rico, 1992; Fredlund y Rahardjo, 1993, etc).

#### 2.2 Procedimientos de compactación por impactos

Para poder determinar la calidad de un material compactado en campo se utiliza el grado de compactación como referencia. Este parámetro está definido como la relación entre el peso volumétrico seco obtenido en campo y el peso volumétrico seco máximo obtenido en una prueba de laboratorio (con respecto a la norma requerida). Por tanto, es necesario determinar ambos parámetros. El segundo se determina generalmente durante la selección de los bancos de materiales y de acuerdo con la norma especificada, mientras que primero se puede evaluar por medio de calas volumétricas una vez que el material ha sido tendido y compactado.

El método tradicional de laboratorio para determinar el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo es el de impactos (pruebas Proctor estándar o modificada). La prueba Proctor estándar consiste en compactar una cantidad de suelo en un molde de 10.1 cm de diámetro por 11.16 cm de altura. El material se compacta en 3 capas y en cada capa se aplican 25 impactos con un pisón de 2.5 kg. Después de compactar la tercera capa, se enrasa y se determina la masa del material compactado. Esto se repite para varios contenidos de agua. Al final se obtiene una serie de datos de pesos volumétricos secos y contenidos de agua que se grafican para obtener el resultado típico que es la curva de compactación. Es importante hacer notar que el número de golpes, la masa de pisón y molde utilizado varía de acuerdo al tamaño máximo de partícula que contenga la muestra (ASTM D698-07e1).

Por otro lado, las diferencias en la prueba Proctor modificada son: la masa de pisón, el tamaño del molde, el número de capas y el número de golpes. Todas estas variables están regidas de igual forma por el tamaño máximo de partícula de la muestra (ASTM D 1557-09).

También existen otros métodos, por ejemplo, el vibratorio que se utiliza más para compactar materiales granulares (gravas y arenas); la compactación estática que consiste en aplicar presión vertical hasta que se logra el peso volumétrico deseado; la compactación por amasado, en donde el suelo se compacta por medio de pisón que se carga y se descarga y que además se va desplazando para compactar toda la superficie de la muestra.

#### 2.3 Compactación con equipo giratorio

El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos encontró que las pruebas de compactación por impactos AASHTO (T-99 y T-180) eran inadecuadas para

simular las condiciones de compactación de campo, particularmente para suelos no cohesivos. Como consecuencia, las carreteras estaban experimentando asentamientos excesivos en la base o en la subrasante. Estos asentamientos se presentaban por la densificación que estaban provocando las cargas del tránsito. En respuesta a lo anterior, se llevaron a cabo investigaciones sobre procedimientos de compactación mejorados para evitar los problemas ya mencionados. Uno de los procedimientos propuestos fue el de compactación con equipo giratorio (Ping, et al., 2003; Milberger y Dunlap, 1966). Este equipo se utilizó en esta investigación.

#### 2.3.1 Descripción del equipo giratorio

Este equipo (Figura 2.1a) fue diseñado para compactar mezclas asfálticas pero en los últimos años se ha utilizado en estudios sobre compactación de suelos (Ping, et al., 2003; Milberger y Dunlap, 1966; Lee et al., 2005, entre otros).

El equipo tiene tres actuadores (Figura 2.1b) que están separados 120 grados alrededor del diámetro exterior del anillo que soporta al molde. Cuenta con un sistema electrónico que envía una señal con una onda senoidal a los tres actuadores; las ondas están desfasadas 120 grados. La amplitud de la onda controla el ángulo y la frecuencia de la velocidad de rotación. La señal de retroalimentación proviene de un transductor de desplazamiento que está directamente en el soporte que conecta el actuador con el molde (Figura 2.1c y d) (Ping, et al., 2003).

El equipo es capaz de producir ángulos de giro entre 0.02 y 3 grados, velocidades de giro de hasta 60 giros por minuto y presión vertical máxima de 999 kPa; el número de giros máximo es de 999.

Mientras la prueba se ejecuta, el programa puede mostrar graficas en tiempo real del número de giros contra parámetros como la densidad del espécimen, la altura, el esfuerzo de corte, ángulo de giro, presión vertical (Figura 2.2).









(C)

(d)

Figura 2.1 Compactador giratorio; (b) Actuadores que se encuentran en la base donde se coloca el molde; (c) Transductor de desplazamiento; (d) Cabezal para aplicar la presión de confinamiento



Figura 2.2 Gráfica en tiempo real del ángulo de giro contra número de giros

La característica principal de este equipo es que la compactación del material se logra por acción simultánea de compresión y fuerzas de corte resultado de la rotación que experimenta el molde con respecto a su eje longitudinal como lo muestra la Figura 2.3.



Figura 2.3 Diagrama de la muestra durante la prueba (tomada del Manual del compactador SERVOPAC)

Uno de los parámetros que reporta el compactador giratorio es el esfuerzo de corte. De acuerdo con lo publicado por Smith y Santi (2004), el diagrama esquemático de las componentes de compactador son las que se muestran en la Figura 2.4.



Figura 2.4 Diagrama esquemático de las componentes del compactador (Smith y Santi, 2004)

Para el análisis de esfuerzos durante la compactación se realiza como sigue (Smith y Santi, 2004):

Considere un espécimen inclinado un cierto ángulo, donde el actuador  $P_1$  es aplicado a su valor máximo (la amplitud de la fuerza senoidal). Los puntos de aplicación de las fuerzas en la parte inferior de la placa se muestran en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Vista en planta de las fuerzas que actúan en el espécimen y el molde (Smith y Santi, 2004)

La fuerza A es el resultado de la presión "a" aplicada por el actuador superior durante el proceso de compactación. Como se observa de la Figura 2.5, el peso de la muestra  $W_m$  y la fuerza A actúan en diferentes puntos con respecto al centroide debido a la rotación.

Haciendo la sumatoria de momentos con respecto a la línea  $P_3$ -R, igualando a cero y despejando para  $P_2$ , se obtiene la ecuación 2.1.

$$P_{2} = \frac{P_{1}d_{1} + Ad_{3} + W_{m}d_{4}}{d_{2}}$$
(2.1)

Donde:

 $\begin{array}{l} d_3 = \delta sen \pi/3 \\ \delta = h \ tan \ \theta \\ \theta = \ \text{Angulo} \ de \ giro \\ h = \ \text{Altura} \ del \ espécimen \\ d_4 = \frac{1}{2}(d_3) \end{array}$ 

Por simetría,  $P_2$  y  $P_3$  son iguales cuando  $P_1$  esta en su amplitud (Figura 2.6).  $P_1$  se mide con la celda de carga y  $P_2$  y  $P_3$  se determinan con la ecuación (2.1).



Figura 2.6 Fuerzas en los actuadores actuando con una onda senoidal desfasada  $120^{\circ}$ 

El esfuerzo de corte se calcula a la mitad del espécimen tomando en cuenta la mitad superior del espécimen como lo indica la Figura 2.7.



**Figura 2.7** Fuerzas que actúan en el espécimen y el molde Haciendo la suma de fuerzas en la dirección horizontal se obtiene que:

$$S_{\theta} = (N_2 - N_1)\cos\theta + (F_1 + F_2)\sin\theta$$
(2.2)

Donde:  $N_1 y N_2 =$  Fuerzas normales  $F_1 y F_2 =$  Fuerzas friccionantes

Las fuerzas normales y friccionantes se calculan como:

$$N_1 = \pi r \frac{h}{2} n_1 \tag{2.3}$$

$$N_2 = \pi r \frac{h}{2} n_2 \tag{2.4}$$

$$\mathbf{F}_{1} = \pi \mathbf{r} \frac{\mathbf{h}}{2} \mathbf{f}_{1} \tag{2.5}$$

$$\mathbf{F}_2 = \pi \mathbf{r} \frac{\mathbf{h}}{2} \mathbf{f}_2 \tag{2.6}$$

Donde:

 $n_1 y n_2 = Esfuerzos normales promedio$   $f_1 y f_2 = Esfuerzos friccionantes promedio$  $r^* = Presión vertical actuando en la parte inferior del espécimen$ 

Al llevar a cabo la sumatoria de fuerzas en la dirección vertical se tiene que:

$$\mathbf{R}^{*} = \left(\mathbf{A} + \frac{\mathbf{W}_{m}}{2}\right) - \left(\mathbf{F}_{1} + \mathbf{F}_{2}\right)\cos\theta + \left(\mathbf{N}_{1} - \mathbf{N}_{2}\right)\sin\theta$$
(2.7)

Donde:

 $R^*$  = Fuerza que actúa en la parte inferior del espécimen A = Fuerza vertical aplicada (constante)  $W_m$  = Peso del espécimen R\* no se localiza al centro del espécimen debido al ángulo aplicado (Figura 2.8). Si se calculan los momentos con respecto a O se tiene otra expresión para R\*:



Figura 2.8 Localización de la resultante de las fuerzas verticales localizada en la parte inferior de la mitad del espécimen analizado

$$R^{*} = \frac{1}{X_{\theta}} \left[ \left( N_{2} - N_{1} \right) \frac{h}{4\cos\theta} - \left( N_{2} + N_{1} \right) rs e^{-\theta} + \left( F_{2} - F_{1} \right) rcos\theta + \left( A + \frac{W_{m}}{2} \right) \frac{h}{2} tan\theta \right]$$
(2.8)

La Figura 2.9 muestra el diagrama de cuerpo libre del molde. Tomando en consideración la suma de las fuerzas verticales se tiene que:

$$\sum P - W_{d} = 2(N_{1} - N_{2}) \sin\theta + 2(F_{1} + F_{2}) \cos\theta$$
(2.9)



Figura 2.9 Diagrama de cuerpo libre del molde

Manipulando las ecuaciones (2.7), (2.8) y (2.9) se obtienen las siguientes dos expresiones:

$$N_{2} - N_{1} = \frac{\left[A + \frac{W_{m}}{2}\right]\left(X_{\theta} - \frac{h}{2}\tan\theta\right) - \frac{1}{2}\left[\sum P - W_{d}\left(X_{\theta} - \frac{r}{\mu}\tan\theta\right)\right]}{\frac{h}{4\cos\theta} + \mu r\cos\theta - r\frac{sen^{2}\theta}{\mu cos\theta}}$$
(2.10)

$$N_1 + N_2 = \frac{\sum P - W_d}{2\mu \cos\theta} + (N_2 - N_1)\frac{\tan\theta}{\mu}$$
(2.11)

Si se sustituye la ecuación (2.11) en la ecuación (2.2) se obtiene la ecuación para el cálculo de la fuerza de corte como sigue:

$$S_{\theta} = (N_2 - N_1)\cos\theta + \frac{1}{2}(\sum P - W_d)\tan\theta + \frac{(N_2 - N_1)\sin^2\theta}{\cos\theta}$$
(2.12)

El término  $(sen^2\theta)/(cos\theta)$  es muy pequeño por lo que puede despreciarse. Entonces, la ecuación final de la fuerza de corte es:

$$S_{\theta} = (N_2 - N_1)\cos\theta + \frac{1}{2}(\sum P - W_d)\tan\theta$$
(2.13)

Para obtener el esfuerzo de corte en cualquier momento sólo se divide por el área transversal.

# 2.3.2 Factores que afectan la compactación en equipo giratorio

Existen varios factores que afectan la compactación con equipo giratorio, entre los que se encuentran: el ángulo de giro, la presión de confinamiento, la velocidad de giro, el número de giros, etc. A continuación se discute cada uno.

<u>Ángulo de giro.</u> Durante el desarrollo de la metodología de diseño de mezclas asfálticas SUPERPAVE, el Instituto del Asfalto llevó a cabo varios estudios sobre los factores que afectan la densificación de la mezcla cuando ésta se compacta en el equipo giratorio. Se llegó a la conclusión que la densidad de la mezcla asfáltica depende en mayor medida del ángulo de giro; por lo que la norma AASHTO T312 menciona que durante el proceso de compactación se debe mantener un ángulo entre  $1.25 \pm 0.002^{\circ}$  (sin embargo, lo anterior aplica a mezclas asfálticas).

<u>Presión de confinamiento.</u> La presión con la que se compacta está relacionada con la presión aplicada por el equipo compactador que se utilizará en el campo y con la presión a la que estará sujeto el suelo durante el paso del tránsito. Para el caso de mezcla asfáltica, se observó que el confinamiento tiene poco efecto en la densidad que se obtiene (Huber, et al. 1996, citado por Browne, 2006) pero para suelos, la presión sí tiene efecto. Por ejemplo, en el estudio de Browne, (2006), indica que a medida que la presión de confinamiento se incrementa, la densidad también muestra el mismo efecto, como se muestra en la Figura 2.10. En esta misma figura también se indica el peso volumétrico seco máximo obtenido en la prueba Proctor estándar y modificada; las condiciones para las cuales se obtiene el  $\gamma_{dmáx}$  de la Proctor estándar es 600 kPa de presión de confinamiento y 400 giros aproximadamente; en esta prueba para ningún caso se alcanzó el peso volumétrico seco máximo obtenido de la prueba Proctor modificada.



Figura 2.10 Efecto de la presión de confinamiento en el peso volumétrico seco (Browne, 2006).

<u>Velocidad de rotación</u>. Según Huber et. al. (1996) citado por Browne (2006), este parámetro también tiene poco efecto en la densidad de la mezcla. En otro estudio llevado a cabo por Ping et. al. (2003) también se encontró que la velocidad de giro tiene poco efecto en la compactación como lo ilustra la Figura 2.11.



Figura 2.11 Efecto de la velocidad de aplicación de los giros en el peso volumétrico seco (Ping, et. al., 2003).

<u>Número de giros.</u> En la Figura 2.12 (Ping et al. 2003), se observa que a medida que el número de giros se incrementa también lo hace el peso volumétrico seco, pero al igual que sucede en una prueba de compactación Proctor, después de un cierto contenido de agua, el peso volumétrico seco tiende a disminuir.



Compactación Giratoria (suelo A-3 Costa del Sol Parkway

Figura 2.12 Efecto del número de giros en el peso volumétrico seco (Ping, et al., 2003).

# 2.4 Resultados reportados en literatura sobre compactación de suelos con equipo giratorio

Ping et. al., (2003) llevaron a cabo un estudio de campo y laboratorio sobre compactación de suelos. En el año 1999 y 2000 obtuvieron los pesos volumétricos y contenidos de agua de materiales de subrasante en tres tramos de carretera que se construyeron en Florida, Estados Unidos. Para la evaluación de los pesos volumétricos de campo, el material de subrasante se compactó con diferentes contenidos de agua y con diferente número de pasadas de los equipos de compactación.

Con respecto a los estudios de laboratorio, se determinaron las curvas de compactación con el método de impactos, vibratorio y giratorio. En este último se consideraron variables como el ángulo de giro, la presión de confinamiento, el número de giros y la velocidad de aplicación de los giros. Las variables consideradas fueron las siguientes:

- ✓ Ángulo de giro de 1 a 1.25 grados.
- ✓ Presión de confinamiento: 100, 200, 300, 400 y 500 kPa.
- ✓ Número de giros: 30, 60 y 90.

✓ Velocidad: 10, 20 y 30 giros por minuto.

En las Figuras 2.13 y 2.14 se muestran algunos de los resultados que se obtuvieron en su estudio.



Figura 2.13 Curvas de compactación de laboratorio y campo obtenidos en la Carretera Thomasville (suelo A-3, SP) (Ping et. al., 2003).



Figura 2.14 Curvas de compactación de laboratorio y de campo para la Carretera Sun Coast (suelo A-3, SP) (Ping et. al., 2003).

De las dos gráficas anteriores se observa que la diferencia de los pesos volumétricos de campo y los obtenidos con la prueba de compactación Proctor modificada son muy diferentes. Para el caso del suelo de la carretera Thomasville, la curva de compactación obtenida con el equipo giratorio está más cercana a la de campo pero no así en el caso del suelo Sun Cost; sin embargo, la diferencia en estas pruebas es que el primer suelo se compactó a 300 kPa de presión confinamiento y la segunda a 200 kPa (Ping et. al., 2003).

Otro de los resultados interesantes que se encontraron en este estudio fue que el peso volumétrico de campo se replica con aproximadamente 90 giros, 200 kPa de presión de confinamiento y un ángulo de giro de 1.25 (Figura 2.15).



Figura 2.15 Selección del número de giros crítico.

Browne, (2006) llevó a cabo otro estudio en el cual comparó las curvas de compactación Proctor estándar y Proctor modificada con datos de compactación obtenidos con equipo giratorio. En su investigación estudió cuatro suelos clasificados como A-1-a (GW o GP), A-3 (SP), A-4 (CL) y A-7-6 (CH) según el sistema de clasificación AASHTO (SUCS) (Tabla 2.1); estos suelos se estudiaron en condiciones secas y a varios contenidos de agua. Para el primer caso, las variables que se utilizaron fueron: un ángulo de giro de 1.25°, la velocidad fue de 30 giros/minuto, 500 giros y las presiones de confinamiento fueron de 200, 300, 400, 500 y 600 kPa. Para el segundo caso sólo se utilizaron presiones de confinamiento de 200 y 600 kPa y las otras variables fueron las ya mencionadas. Para los suelos finos se compactaron 4 000 g y para los granulares 4 500 g.

Las propiedades de los suelos se resumen en la Tabla 2.1. Como se puede observar de las propiedades, los tipos de suelos estudiados cubren un rango
amplio, es decir, van desde suelos finos hasta gravas. Además, el contenido de material fino va desde muy bajo a alto, por lo que se espera que el comportamiento del suelo sea muy diferente.

Tipo de	Límites de Atterberg		Pasa la	Gs	Proctor estándar		Procor modificada		
suelo	LL (%)	LP (%)	IP (%)	malla		Wopt (%)	γdmax	W <sub>opt</sub> (%)	γdmax
				No. 200		-	(kN/m <sup>3</sup> )		$(kN/m^3)$
A-1-a	NP	NP	NP	3.5	2.68	17.45	9.30	18.64	8.7
A-3	NP	NP	NP	7.5	2.63	17.45	12.00	18.39	11.0
A-4	29.7	7.9	21.8	57.4	2.66	16.89	16.40	18.47	14.0
A-7-6	83.7	23.9	59.8	65.1	2.65	15.10	19.35	16.30	16.5

Tabla 2.1 Propiedades de los suelos estudiados

Las Figuras 2.16 a 2.19 muestran algunos de los resultados en donde se observa el cambio en el peso volumétrico seco.



Figura 2.16 Suelo A-1-a (GW o GP) compactado seco y a diferentes presiones de confinamiento (Browne, 2006).



Figura 2.17 Suelo A-3 (SP) compactado seco y a diferentes presiones de confinamiento (Browne, 2006).



Figura 2.18 Suelo A-4 (CL) compactado seco y a diferentes presiones de confinamiento (Browne, 2006).



Figura 2.19 Suelo A-7-6 (CH) compactado seco y a diferentes presiones de confinamiento (Browne, 2006).

De las cuatro figuras anteriores se puede observar que el peso volumétrico seco de los materiales se incrementa a medida que el número de giros o la presión de confinamiento se incrementan (Browne, 2006). Los resultados corresponden a muestras que se compactaron en estado seco. Asimismo, se observa que para el suelo A-3 (SP), el peso volumétrico seco máximo tanto de la prueba Proctor estándar como el de la modificada se alcanzan con diferentes condiciones de número de giros y presiones de confinamiento. Para este mismo suelo, el peso volumétrico seco máximo de la curva de compactación Proctor estándar se puede lograr con presiones de confinamiento entre 300 y 800 kPa pero para un número de giros de aproximadamente 20.

Para el caso del suelo A-7-6 (CH) no se alcanza el peso volumétrico seco máximo de la prueba Proctor modificada, sólo se logra el de la prueba Proctor estándar. Es notable el hecho que el número de giros para alcanzar el peso volumétrico seco máximo se incrementa a medida que la presión de confinamiento disminuye (Figura 2.20).

Con respecto a las muestras que se compactaron a varios contenidos de agua, se obtuvieron los resultados mostrados en las Figuras 2.21 y 2.22. En la Figura 2.21 se distingue que para una presión de confinamiento de 200 kPa, el suelo requiere un menor número de giros para alcanzar el peso volumétrico de la prueba Proctor estándar si el contenido de agua se incrementa. En este caso, el peso volumétrico seco máximo de la Prueba Proctor modificada sólo se alcanza con un número de giros entre 450 y 500 y para un contenido de agua de 8.94 %. Por otro lado, cuando las muestras se compactaron con una presión de confinamiento de 600

kPa, el peso volumétrico seco máximo de la prueba Proctor estándar se obtuvo para un número de giros bajo. Entonces, a mayor presión de confinamiento, menor será el número de giros requerido para lograr un cierto peso volumétrico (Figura 2.21).



Figura 2.20 Muestras compactadas a diferentes contenidos de agua con una presión de confinamiento de 200 kPa (suelo A-1-a) (Browne, 2006).





Los resultados de las dos graficas anteriores también se pueden reportar en el espacio de compactación como lo muestran las Figuras 2.22 y 2.23.



Figura 2.22 Curvas de compactación para 0, 75, 90 y 500 giros y una presión de confinamiento de 200 kPa (Browne, 2006).



Figura 2.23 Curvas de compactación para 0, 75, 90 y 500 giros y una presión de confinamiento de 600 kPa (Browne, 2006).

Si se revisan las gráficas parece que era necesario que se compactaran más muestras a contenidos de agua mayores a 9 %; sin embargo, al compactar el suelo en el equipo giratorio, el agua drena y el contenido de agua varía con respecto al inicial. De hecho, si se tiene en cuenta la ecuación para cálculo del peso volumétrico seco, si la humedad disminuye el peso volumétrico se

incrementa. Probablemente, en las dos gráficas anteriores, las muestras perdieron agua lo que provocó el incremento en peso volumétrico seco.

Con respecto al suelo A-3 (SP), se obtuvieron los resultados mostrados en la Figuras 2.24 y 2.25. Para esta arena, los pesos volumétricos secos máximos tanto de la prueba Proctor estándar como el de la modificada se alcanzan para todos los contenidos de agua.



Figura 2.24 Curvas de peso volumétrico a diferentes contenidos de agua y a una presión de 200 kPa (suelo A-3) (Browne, 2006).



Figura 2.25 Curvas de peso volumétrico a diferentes contenidos de agua y a una presión de 600 kPa (suelo A-3) (Browne, 2006).

Si se grafican los pesos volumétricos secos obtenidos a 500 giros para las presiones de 200 y 600 kPa, se observa que éstos siempre están por arriba de los obtenidos con la prueba de compactación Proctor modificada, como ya se había indicado en las gráficas anteriores (Figura 2.26), además, las gráficas también indican que para contenidos de agua mayores del 9%, el comportamiento del peso volumétrico seco es errático, es decir, en algunos puntos se incrementa y en otros se reduce.



Figura 2.26 Curvas de compactación para presiones de 200 y 600 kPa (500 giros, suelo A-3) (Browne, 2006).

La Figura 2.27 indica que para el suelo A-4 (CL), las curvas de compactación obtenidas con el equipo giratorio con presiones de confinamiento de 200 y 600 kPa tienen la forma de las curvas de compactación Proctor estándar y modificada. La presión más baja proporciona una curva cercana a la curva de compactación Proctor estándar y para 600 kPa la curva obtenida está ligeramente por debajo de la modificada.



Figura 2.27 Curvas de compactación para presiones de 200 y 600 kPa (500 giros, suelo A-4) (Browne, 2006).

Para el caso del suelo A-7-6 (CH), también se observa que la curva de compactación en donde se aplicó una presión de confinamiento de 600 kPa, se ajusta a los datos de la curva de compactación Proctor modificada, sin embargo, parecen mostrar contenidos de agua y pesos volumétricos secos máximos diferentes (Figura 2.28).



Figura 2.28 Curvas de compactación para presiones de 200 y 600 kPa (500 giros, suelo A-7-6) (Browne, 2006).

De acuerdo con los resultados del estudio anterior, pareciera que las curvas de compactación obtenidas con el equipo giratorio se asemejan mucho más a las

obtenidas con la prueba Proctor estándar o modificada a medida que los suelos tienen una mayor cantidad de suelo fino, por ejemplo en este caso, el suelo A-4 (CL) y A-7-6 (CH).

Otro estudio es el reportado por Camacho, Reyes y Méndez (2007). En esta investigación los autores llevaron a cabo un estudio de compactación en equipo giratorio con una arena limosa para determinar la viabilidad de este método como alternativa al procedimiento Proctor. En la investigación las muestras se compactaron a 300 giros, a una velocidad de 30 giros por minuto; el ángulo de giro se mantuvo constante con un valor de 1.25°. Las presiones de confinamiento fueron de 100, 150, 200, 300, 350 y 400 kPa.

Dos de las gráficas típicas que se obtuvieron durante este estudio se muestran en las Figuras 2.29 y 2.30.



Figura 2.29 Variación del peso volumétrico seco de una arena limosa compactada con una presión vertical de 400 kPa (Camacho et. al. 2007).



Figura 2.30 Variación del peso volumétrico seco de una arena limosa compactada con una presión vertical de 350 kPa (Camacho et al. 2007).

En el trabajo de Camacho et. al. (2007), después del análisis de la información se llegó a la conclusión que para alcanzar la energía de compactación Proctor modificada se podían tener dos casos: una presión de confinamiento de 400 kPa, 100 giros y un ángulo de giro de 1.25 ó 350 kPa de confinamiento, 300 giros y 1.25 de ángulo de giro. Como se puede observar, los contenidos máximos de agua a los que se trabajó fueron entre 9.5 % y 10 % ya que en el mismo documento se indica que para mayores contenidos de agua, durante el proceso de compactación ésta tiende a fluir, por lo que la muestra al final presenta contenidos de agua que no son representativos de las condiciones iniciales.

De acuerdo con la información analizada, no existe una condición única en cuanto a número de giros, presión de confinamiento o ángulo de giro para alcanzar los pesos volumétricos secos máximos obtenidos de la prueba Proctor estándar o modificada, sino que pueden ser varias combinaciones.

## 3. Materiales estudiados y procedimientos de prueba

### 3.1 Descripción de los materiales utilizados

Numerosas investigaciones que se llevan a cabo para determinar el comportamiento de los suelos utilizan materiales ideales o materiales que no son representativos de los que se utilizan en los proyectos reales. Por ello, en esta investigación se buscó que los suelos en estudio fueran lo más parecido a los que se utilizan en proyectos carreteros. En las fechas en las que se inició este proyecto se llevó a cabo la construcción de la pista de pruebas del Instituto Mexicano del Trasporte (localizada en Sanfandila, Pedro Escobedo), la cual se construyó de acuerdo con la sección que se muestra en la Figura 3.1.



#### Figura 3.1 Estructura de pista de pruebas del Instituto Mexicano del Transporte

La investigación que se reporta en este trabajo se enfocó al estudio del comportamiento de suelos finos, por tanto, los materiales de interés fueron el de terraplén y el de subrasante. Los bancos de donde se extrajeron estos materiales fueron el MISHA (ubicado en Sanfandila, Pedro Escobedo), y el de Los Cues o Lucio Fajardo (localizado en la localidad de los Cues), los cuales se muestran en la Figura 3.2.



a) Banco MISHA

b) Banco Los Cues o Lucio Fajardo

Figura 3.2 Bancos de los cuales se extrajeron los materiales estudiados.

Posterior al muestreo, los materiales se cribaron por la malla No. 4, se secaron al aire, se cuartearon y se almacenaron en costales para su uso posterior.

## 3.2 Procedimientos de prueba

#### 3.2.1. Propiedades índice

Para determinar las propiedades índice de los materiales se siguieron los procedimientos especificados por las normas ASTM, es decir, ASTM D2216 (contenido de agua), ASTM D 1140-00 (cantidad de suelo más fino que la malla No. 200), ASTM D 4318-05 (determinación de límites de consistencia) y ASTM D 854-10 (peso especifico relativo de sólidos).

# 3.2.2. Compactación de muestras en el equipo giratorio para determinar las curvas de compactación

Para poder llevar a cabo esta etapa del proceso de investigación se siguieron los pasos que a continuación se enumeran:

- 1. Se determinaron las curvas de compactación Proctor estándar y modificada de los materiales en estudio de acuerdo con los procedimientos de las normas ASTM D 698 07e1 y ASTM D 1557-09.
- 2. Una vez que se determinaron los rangos de contenidos de agua en los que se encontraban las curvas de compactación Proctor estándar y modificada,

se eligieron los contenidos de agua a los que se prepararon las muestras a compactar en el equipo giratorio. Por ejemplo, para el material de terraplén las muestras se prepararon para contenidos de agua entre 27% y 40 %; para el material de subrasante, los contenidos de agua estuvieron entre 15% y 27%.

- 3. Posteriormente, se calculó la cantidad de agua necesaria a agregar al suelo de tal forma que se alcanzara el contenido de agua requerido.
- 4. Se mezcló el suelo con el agua (Figura 3.3a); la mezcla se colocó en una bolsa de plástico y se dejó almacenada durante 24 horas (Figura 3.3b).



(a)

(b)

Figura. 3.3 Preparación de muestras. (a) Adición de agua y mezclado; (b) Material colocado en bolsa de plástico para permitir la uniformización del contenido de agua.

- 5. Se pesaron 2 300 g de suelo húmedo y se colocaron en el molde del compactador giratorio (Figura 3.4a) (Nota: esta cantidad fue la utilizada en todo el proyecto aunque puede ser diferente).
- 6. Se programó el equipo para que compactara el espécimen (Figura 3.4b). Las variables que se utilizaron durante todo el estudio fueron las siguientes:
  - ✓ Ángulo de giro: 1.25°
  - ✓ Presión vertical: 200, 300, 400, 500 y 600 kPa
  - ✓ Número de giros: 500
  - ✓ Velocidad: 10, 20 y 30 giros/minuto
  - ✓ Tipo de suelo: 2 tipos [limo de baja compresibilidad (ML) y arena limosa (SM)].



```
(a) (b)
```

Figura 3.4 (a) Material colocado en el molde; (b) Muestra compactada en equipo SERVOPAC.

- Al finalizar el proceso de compactación en el equipo giratorio, la muestra se extrajo por medio del gato integrado al equipo (Figura 3.4b); se tomaron las dimensiones (altura y diámetro) y el peso para posteriormente determinar el peso volumétrico seco.
- 8. Después de tomar los datos anteriores, la muestra de disgregó para determinar el contenido de agua promedio. Para esto, se tomaron muestras en tres partes del espécimen (superior, medio e inferior). El contenido de agua final se reportó como el promedio de los tres.
- 9. Durante el proceso de compactación en el equipo giratorio el equipo genera una tabla con datos como: No. de giros, ángulo de giro, esfuerzo de corte y altura del espécimen. Con la altura del espécimen y el contenido de agua se calculó el peso volumétrico seco, el cual se graficó contra el número de giros como se muestra en la Figura 3.5. En esta misma figura también se muestran el número de giros para los cuales se tomaron los pesos volumétricos secos que posteriormente se analizaron (pesos volumétricos correspondientes al número de giros de 100, 200, 300, 400 y 500).



Figura 3.5 Gráfica de peso volumétrico seco contra número de giros

 De igual forma, se graficó el número de giros contra el esfuerzo de corte. Para el análisis también se tomaron los esfuerzos de corte a 100, 200, 300, 400 y 500 giros (Figura 3.6).



Figura 3.6 Gráfica de esfuerzo de corte contra número de giros.

# 3.2.3. Preparación de los especímenes ensayados en compresión simple o módulo de resiliencia (en equipo giratorio)

El procedimiento fue el siguiente:

- Las características de compactación de las probetas se controlaron con respecto a la curva de compactación Proctor estándar. Más específicamente, seis probetas se compactaron con contenido de agua óptimo y peso volumétrico seco máximo (tres para compresión simple y tres para módulo de resiliencia), 6 probetas con contenido de agua 2% abajo del óptimo y con peso volumétrico que correspondiera a la curva de compactación y otras 6 probetas 2 % con contenido de agua arriba del óptimo y con peso volumétrico de acuerdo a la curva de compactación.
- 2. Para elegir las variables que se controlarían al llevar a cabo la compactación en el equipo giratorio, se graficaron las curvas de compactación generadas con 200 kPa de presión de confinamiento y con una velocidad de 20 giros/minuto. De acuerdo con la Figura 3.7, los especímenes se compactaron a la velocidad y presión de confinamiento mencionadas y con 200 giros. Los contenidos de agua fueron 30, 32 y 34%.



Figura 3.7 Localización de los puntos para los cuales se determinó la resistencia en compresión no confinada (CS) y el módulo de resiliencia (M<sub>r</sub>)

3. Las pruebas de módulo de resiliencia se llevaron a cabo en probetas cuyas dimensiones fueron: 7.1 cm de diámetro y 14.4 cm de altura; para homologar el tamaño de las probetas, las utilizadas para el ensaye de compresión simple también fueron de las mismas dimensiones.

Las probetas compactadas en el equipo giratorio son de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, por lo que se tuvieron que labrar a dimensiones de 7.1 cm por 14.4 cm de diámetro y altura, respectivamente. La secuencia de fotos de la Figura 3.8a,b, c y d muestra el proceso de labrado.



(a)







(d)



(e)

(C)

- Figura 3.8 Procedimiento para labrar una probeta de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para obtener una de 7.1 cm de diámetro y 14.4 cm de altura
  - 4. Después del labrado, la última fase del procedimiento fue el ensaye en compresión no confinada o módulo de resiliencia; los procedimientos se describen en los incisos 3.2.6 y 3.2.7, respectivamente.

# 3.2.4 Preparación de los especímenes ensayados en compresión simple o módulo de resiliencia (compactada por impactos)

Para el caso de los especímenes compactados por impactos, el procedimiento fue el siguiente:

- **1.** Se calculó la cantidad de agua a agregar para obtener el contenido de agua requerido.
- **2.** Se agregó el agua a la muestra (Figura 3.9a) y se homogeneizó para posteriormente almacenarlo durante 24 horas.
- 3. Se calculó la cantidad de material a colocar en el molde de 7.1 cm de diámetro por 14.4 cm de altura de tal forma que se alcanzara el peso volumétrico seco requerido.
- 4. Como la norma de compresión simple o módulo de resiliencia no especifican el número de capas en el que se deba preparar la probeta, en este proyecto se utilizaron 8 capas.
- 5. Se colocó la cantidad de material de la primera capa y se compactó por impactos.
- **6.** Después se escarificó la superficie, se colocó el material de la segunda capa y se compactó.
- 7. Al término de la compactación de la última capa, la muestra se enrasó y se extrajo del molde (Figura 3.9b).
- 8. Al igual que en el caso anterior, se ensayó en compresión simple o módulo de resiliencia.





(a)



Figura 3.9 Adición de agua requerida para alcanzar el contenido de agua especificado; (b) Probeta compactada en el molde de 7.1 cm de diámetro por 14.4 cm de altura.

# 3.2.5. Procedimiento para determinar la resistencia en compresión simple

El procedimiento fue el siguiente:

- Cuando ya se tenía lista la probeta para ensaye, se tomaron sus dimensiones y su peso.
- Luego, se colocó en el equipo triaxial siguiendo los pasos mostrados en la Figura 3.10. Estos consisten de lo siguiente: (a) Primeramente se colocó un disco poroso en el cabezal inferior junto con un disco de papel filtro, la muestra se coloca sobre éstos; después, sobre la superficie de la muestra se colocó otro papel filtro y posteriormente el cabezal superior (Figura 3.10a). Inmediatamente se colocó una membrana de latex sobre la muestra para evitar pérdida de agua (Figura 3.10b y c). Posteriormente se coloca la celda de lucita y luego se atornilla al sistema de carga para iniciar la prueba (Figura 3.10d).
- Se aplicó carga al espécimen con una velocidad de 1.2 %/min hasta alcanzar la falla (la norma ASTM D 2166-06 especifica una velocidad en el rango de 0.5 a 2 %/min).
- Durante la aplicación de la carga el programa CATS muestra una gráfica en tiempo real de la carga aplicada contra la deformación del espécimen como se muestra la Figura 3.11a. Cuando la falla es inminente (Figura 3.11b), la prueba se termina y se desmonta el espécimen.
- Al finalizar la prueba, el espécimen se disgrega y se toman tres muestras para determinar el contenido de agua final.



(d)

Figura 3.10 (a) Colocación de la muestra sobre el cabezal inferior del equipo triaxial; (b) Molde donde se expande la membrana para colocarla en la muestra; (c) Membrana de látex colocada sobre la muestra; (d) Muestra colocada en el interior de la celda y en donde el vástago de carga está atornillado al sistema de aplicación de carga



Figura 3.11 Curva esfuerzo-deformación del espécimen; (b) Probeta en la cual se puede observar el plano de falla

#### 3.2.6 Procedimiento para determinar el módulo de resiliencia

La prueba de módulo de resiliencia tiene como finalidad determinar el comportamiento de los materiales de base, subbase y subrasante ante el efecto de cargas cíclicas. Este parámetro se define como la relación entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación recuperable. Expresando la definición en forma de ecuación se tiene lo siguiente:

$$M_{r} = \frac{\sigma_{d}}{\varepsilon_{r}}$$
(3.1)

Donde: Mr = Módulo de resiliencia;  $\sigma_{d}$  = Esfuerzo desviador;  $\epsilon_{r}$  = Deformación recuperable

El protocolo utilizado en este trabajo fue el correspondiente al NCHRP 1-28 A denominado "Determinación del módulo de resiliencia para diseño de pavimentos flexibles".

Para llevar a cabo este tipo de prueba, se requiere de un equipo triaxial capaz de aplicar cargas en forma cíclica y que además cuente con los sensores adecuados para determinar las deformaciones que se presenten en el espécimen. Para las pruebas que se llevaron a cabo en este estudio, se utilizó el equipo triaxial cíclico que se muestra en la Figura 3.12a. La carga se aplica con una función senoidal desfasada 270° (Figura 3.12b). El tiempo de aplicación de la carga fue de 0.2 de segundo y 0.8 s de tiempo de reposo. Esto se repite todas las combinaciones de esfuerzo desviador y confinamientos mostrados en la Tabla 3.1.



(a)

- Figura 3.12(a) Equipo triaxial para determinar el módulo de resiliencia; (b) Vista de la aplicación de la carga cíclica al espécimen contra el tiempo
  - Tabla 1 Esfuerzos de confinamiento y desviadores aplicados en la prueba de módulo de resiliencia según el protocolo NCHRP 1-28A

Secuencia No.	Confinamiento, σ₃ (kPa)	Esfuerzo de contacto (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	No. de repeticiones
0	27.6	5.5	48.3	1000
1	55.2	11.0	27.6	100
2	41.4	8.3	27.6	100
3	27.6	5.5	27.6	100
4	13.8	2.8	27.6	100
5	55.2	11.0	48.3	100
6	41.4	8.3	48.3	100
7	27.6	5.5	48.3	100
8	13.8	2.8	48.3	100
9	55.2	11.0	69.0	100
10	41.4	8.3	69.0	100
11	27.6	5.5	69.0	100
12	13.8	2.8	69.0	100
13	55.2	11.0	96.6	100
14	41.4	8.3	96.6	100
15	27.6	5.5	96.6	100
16	13.8	2.8	96.6	100

# 4. Discusión de los resultados

### 4.1 Propiedades índice

De acuerdo con los límites de consistencia y tomando como base el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, los materiales utilizados en el estudio se clasificaron como un limo de baja compresibilidad (ML) y arena limosa (SM). La Tabla 4.1 resume las propiedades índice de estos suelos.

Tipo de material y	Límites de			Material	Gs
clasificación	consistencia			que pasa la	
	LL	LP	IP	malla No.	
	(%)	(%)	(%)	200 (%)	
Material de terraplén, ML	44	33	11	87	2.56
Material de subrasante, SM	NP	NP	NP	37	2.52

Tabla 4.1 Pro	piedades índice	de los matei	riales y clasifi	cación
			,	

Nota: LL = Límite líquido; LP = Límite plástico; IP = Índice de plasticidad;  $G_s$  = Peso específico relativo de sólidos

### 4.2 Curvas de compactación

Para determinar las características de compactación de los materiales utilizados, se llevaron a cabo tres pruebas Proctor estándar y tres Proctor modificada para cada material según las normas ASTM D698-07e1 y ASTM D1557-09. Todos los pesos volumétricos secos y los contenidos de agua obtenidos de las tres determinaciones se graficaron en el espacio de compactación para posteriormente dibujar la curva de compactación como se muestra en las Figuras 4.1 y 4.2. La Figura 4.1 corresponde al material de terraplén y la 4.2 al material de subrasante.

La Figura 4.1 indican que el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo para el material de terraplén fueron 32 % y 13.00 kN/m<sup>3</sup> para la estándar y 24.5 % y 14.6 kN/m<sup>3</sup> para la modificada.



Figura 4.1 Curvas de compactación Proctor estándar y modificada del material de terraplén.

Para el material de subrasante, los resultados obtenidos en la prueba Proctor estándar y modificada son los mostrados en la Figura 4.2 e indican que el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo fueron de 23.54% y 14.04 kN/m<sup>3</sup> para la estándar y 19.0 % y 15.17 kN/m<sup>3</sup> para la modificada.



Figura 4.2 Curvas de compactación Proctor estándar y modificada del material de subrasante.

# 4.3 Curvas de compactación obtenidas con el equipo giratorio y comparadas con las obtenidas en la prueba Proctor

En este inciso se presenta la discusión de los resultados obtenidos con las muestras compactadas en equipo giratorio. Primeramente se presentan los resultados para el material de terraplén y posteriormente los del material de subrasante.

### 4.3.1 Material de terraplén

En las Figuras 4.3 a 4.7 se muestran las gráficas en donde se pueden observar las curvas de compactación obtenidas con el procedimiento de la prueba Proctor estándar y modificada así como las obtenidas compactando el material con equipo giratorio; estos resultados corresponden a las diferentes presiones de confinamiento y a una velocidad de 10 giros/minuto; los datos se graficaron para 100, 200, 300, 400 y 500 giros. De igual forma, en la parte (b) de estas mismas figuras se muestran los esfuerzos de corte para el número de giros ya mencionado.





**Figura 4.3** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 10 giros/minuto; 200 kPa de presión de confinamiento).





**Figura 4.4** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 10 giros/minuto; 300 kPa de presión de confinamiento).





**Figura 4.5** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 10 giros/minuto; 400 kPa de presión de confinamiento).





**Figura 4.6** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 10 giros/minuto; 500 kPa de presión de confinamiento).





**Figura 4.7** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 10 giros/minuto; 600 kPa de presión de confinamiento).

Como se puede observar de las curvas anteriores, por ejemplo, para una condición de 100 giros y 200 kPa de presión de confinamiento, se obtiene una curva similar a la Proctor estándar, sin embargo, la pendiente de la curva entre los dos primeros puntos compactados en el equipo giratorio es mayor, lo que muestra que el material rápidamente se densifica.

À medida que el número de giros se va incrementando, el peso volumétrico también lo hace, sin embargo, la forma de la curva se mantiene constante. Es importante hacer notar que el desplazamiento de la curva hacia arriba indica que la energía aplicada al material se va incrementando a medida que se acrecienta el número de giros, no obstante, la separación entre curvas es muy ligera.

Por otro lado, las Figuras 4.4(a) a 4.7(a) indican que al aumentar la presión de confinamiento (en la compactación con equipo giratorio), el peso volumétrico seco del material se incrementa pero en ningún caso se logra alcanzar el peso volumétrico de la curva de compactación Proctor modificada. De las mismas figuras se puede observar que para incrementar la energía es más eficiente hacerlo con presión de confinamiento que con número de giros. Aplicado a condiciones de campo; entonces, probablemente sea más rápido alcanzar un peso volumétrico seco incrementando el peso de los equipos que acrecentando el número de pasadas de un equipo ligero.

Por otro lado, las Figuras 4.5(a), 4.6(a) y 4.7(a) indican que las curvas de compactación se siguen desplazando hacia arriba a medida que la presión de confinamiento se incrementa. Sin embargo, en la rama húmeda de la curva de compactación, todas las curvas presentan una misma tendencia.

De las curvas de esfuerzo de corte graficadas en el espacio de compactación, se observa que este parámetro se incrementa a medida que se aumenta la presión de confinamiento. Asimismo, para una misma presión de confinamiento se observa que el esfuerzo de corte se reduce a medida que se incrementa el contenido de agua, sin embargo, dicha reducción es más rápida en especímenes que se compactan en la rama seca de la curva de compactación Proctor estándar; a partir del óptimo de compactación, el esfuerzo de corte parece mantenerse en un valor constante (Figura 4.3b, 4.4b, 4.5b, 4.6b y 4.7b).

Lo que también se puede observar de las diferentes curvas de esfuerzo de corte (que están graficadas para diferente número de giros), es que éstas no presentan gran separación entre ellas, lo que significa que el esfuerzo de corte parece ser independiente del número de giros con los que se compacte. Sólo en los primeros giros (menos de 100 giros) se presenta el cambio máximo en este parámetro (Figura 4.8).



Figura 4.8 Evolución del esfuerzo de corte a medida que el número de giros se incrementa.

Los resultados anteriores corresponden a una velocidad de 10 giros/minuto. Las Figura 4.9 a 4.18 indican los resultados para una velocidad de 20 y 30 giros/minuto.



**Figura 4.9** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 20 giros/minuto; 200 kPa de presión de confinamiento).



**Figura 4.10** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 20 giros/minuto; 300 kPa de presión de confinamiento).



(b)

**Figura 4.11** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 20 giros/minuto; 400 kPa de presión de confinamiento).



Figura 4.12 (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 20 giros/minuto; 500 kPa de presión de confinamiento).



(b)

Figura 4.13 (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 20 giros/minuto; 600 kPa de presión de confinamiento).


(b)

**Figura 4.14** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 30 giros/minuto; 200 kPa de presión de confinamiento).



#### (b)

**Figura 4.15** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 30 giros/minuto; 300 kPa de presión de confinamiento).



(b)

**Figura 4.16** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 30 giros/minuto; 400 kPa de presión de confinamiento).



<sup>(</sup>b)

Figura 4.17 (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 30 giros/minuto; 500 kPa de presión de confinamiento).



(b)

**Figura 4.18** (a) Curvas de compactación obtenidas con el procedimiento Proctor estándar y modificada y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 30 giros/minuto; 600 kPa de presión de confinamiento).

Lo comentado para las gráficas obtenidas a 10 giros/minuto también aplica a las de 20 y 30 giros/minuto, sin embargo, para poder observar mejor el efecto de cada una de las variables, a continuación se presentan los resultados anteriores en algunas gráficas en las que el efecto se ve más claro.

#### Efecto de la velocidad de rotación en $\gamma_d$ y en el esfuerzo de corte

Para poder observar el efecto de la velocidad de rotación se graficó el peso volumétrico seco contra el contenido de agua para una presión de confinamiento constante. La Figura 4.19a y b muestra el caso de la presión de confinamiento de 200 kPa y 600 kPa.



Figura 4.19 Efecto de la velocidad de rotación en el peso volumétrico seco.

Como se puede notar en las dos gráficas anteriores, el efecto de la velocidad de rotación es mínimo al menos para las velocidades estudiadas. Por tanto, se podría recomendar compactar el material a 30 giros por minuto puesto que esto agiliza el proceso de compactación. Por otro lado, el esfuerzo de corte parece ser independiente de la velocidad de rotación cuando la presión de confinamiento es baja (200 kPa) (Figura 4.20a); para el caso en el cual la presión vertical se incrementa a 600 kPa, al parecer el esfuerzo de corte no varía cuando el material tiene un contenido de agua que se encuentra en la rama seca de la curva de compactación Proctor estándar, pero más allá del óptimo a medida que la velocidad de rotación es mayor, los esfuerzos de corte alcanzan valores más bajos, sin embargo, parecen mantenerse constantes a partir del contenido de agua óptimo de la prueba Proctor estándar.



Figura 4.20 Efecto de la velocidad de rotación en el esfuerzo de corte.

#### Efecto de la presión vertical en $\gamma_d$ y en el esfuerzo de corte

Otro análisis de los datos es el siguiente. Si se grafican resultados de peso volumétrico seco y esfuerzo de corte para muestras con contenidos de agua similares y compactadas a diferentes presiones se obtiene lo siguiente: La gráfica de peso volumétrico seco contra número de giros indica que a medida que se incrementa la presión vertical de compactación, el peso volumétrico seco se incrementa. Si se mantiene un número de giros constante, por ejemplo 100 giros, el peso volumétrico se incrementa de 12.65 kN/m<sup>3</sup> a 13.71 kN/m<sup>3</sup>. Por otro lado, la mayor parte de la densificación del material se presenta con menos de 100 giros.



Figura 4.21 Efecto de la presión vertical en el peso volumétrico seco.

La Figura 4.22 muestra el comportamiento del esfuerzo de corte para las mismas muestras de la gráfica anterior. De esta gráfica se observa que el esfuerzo de corte se incrementa a medida que la presión vertical de compactación se incrementa, sin embargo, la velocidad a la que el esfuerzo se desarrolla difiere para diferentes presiones; a presiones más bajas, el número de giros al que el esfuerzo de corte se mantiene constante es más bajo (Figura 4.22).



Figura 4.22 Comportamiento del esfuerzo de corte para tres diferentes presiones de compactación.

Analizando las curvas de compactación para una velocidad de 20 giros/minuto, se observa que a medida que la presión vertical de compactación se incrementa, las curvas de compactación van desplazándose hacia arriba. Es decir, el peso volumétrico seco máximo se incrementa y la humedad óptima se reduce, mismo efecto que se observa cuando la energía de compactación se incrementa. Por otro lado, la Figura 4.24 muestra las gráficas de esfuerzo de corte para la misma velocidad de compactación. De éstas se observa que el material compactado en la rama seca (con respecto a la curva de compactación Proctor estándar) es al que más le afecta la presión de compactación. Cuando el material presenta un contenido de agua superior al del óptimo de compactación (con respecto a la Proctor estándar), el esfuerzo de corte parece ser independiente de la presión aplicada.



Figura 4.23 Efecto de la presión vertical en las curvas de compactación.



Figura 4.24 Efecto de la presión vertical en las curvas de contenido de agua contra esfuerzo de corte

### 4.3.2 Material de subrasante

El análisis de los resultados del material de subrasante se llevó a cabo de una forma similar al material de terraplén. De las Figuras 4.25 a la 4.29 se muestran los resultados para 10 giros/minuto, de la 4.30 a la 4.34 para 20 giros/minuto y para 30 giros/minuto, las Figuras son de la 4.35 a la 4.39.



(b)

Figura 4.25 (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 10 giros/minuto; 200 kPa de presión de confinamiento).







**Figura 4.26** (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 10 giros/minuto; 300 kPa de presión de confinamiento).



Figura 4.27 (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 10 giros/minuto; 400 kPa de presión de confinamiento).



(a)







**Figura 4.29** (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 10 giros/minuto; 600 kPa de presión de confinamiento).







**Figura 4.30** (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 20 giros/minuto; 200 kPa de presión de confinamiento).



Figura 4.31 (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 20 giros/minuto; 300 kPa de presión de confinamiento).



Figura 4.32 (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 20 giros/minuto; 400 kPa de presión de confinamiento)



Figura 4.33 (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 20 giros/minuto; 500 kPa de presión de confinamiento).



Figura 4.34 (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 20 giros/minuto; 600 kPa de presión de confinamiento).



**Figura 4.35** (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 30 giros/minuto; 200 kPa de presión de confinamiento).



Figura 4.36 (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 30 giros/minuto; 300 kPa de presión de confinamiento).



Figura 4.37 (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 30 giros/minuto; 300 kPa de presión de confinamiento).



(a)



**Figura 4.38** (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 30 giros/minuto; 400 kPa de presión de confinamiento).



**Figura 4.39** (a) Curvas de compactación obtenidas con la prueba Proctor y con equipo giratorio, (b) Curvas de esfuerzo de corte sobrepuestas en el espacio de compactación (velocidad de 30 giros/minuto; 500 kPa de presión de confinamiento).

Al comparar las curvas de compactación obtenidas con los procedimientos Proctor y las obtenidas con el equipo giratorio se nota que el efecto es similar al observado y comentado en el material de terraplén; es decir, para la presión de confinamiento más baja, las curvas están cercanas a la obtenida con el procedimiento Proctor estándar, y a medida que la presión de confinamiento se incrementa las curvas de compactación se desplazan hacia arriba pero en ningún caso se logran alcanzar el punto máximo de la curva Proctor modificada. Sin embargo, una característica muy particular de este suelo, y puesto que la cantidad de arena que contiene es un 73 %, el peso volumétrico seco no presenta una reducción como se obtiene de una prueba Proctor. La explicación de este comportamiento se debe a que cuando los especímenes se compactan con contenidos de agua cercanos al óptimo y superiores, el agua de la muestra empieza a fluir, de tal forma que el contenido de agua inicial con el que se preparó la muestra se reduce, lo que trae como consecuencia que el peso volumétrico se incremente. De hecho, la Figura 4.40 muestra una fotografía de una muestra compactada en tales condiciones y en la cual se observa que al extraer el espécimen existe una gran cantidad de agua en la superficie.



Figura 4.40 Muestra de material de subrasante compactada en donde se observa cómo al final de la compactación el agua se acumula en la superficie

Para este tipo de material, se observa que existen pocas condiciones bien definidas para las cuales se obtienen los óptimos de compactación y precisamente se debe a que no se define bien la curva.

Con respecto a los esfuerzos de corte, mientras que en el material de terraplén se reducían a medida que el contenido de agua se incrementaba, en el material de

subrasante el esfuerzo de corte se incrementa a medida que el contenido de agua se incrementa pero hasta un cierto valor que en este caso está entre 21 y 23%.

De acuerdo con la norma SCT N.CMT.1.03/02, el material de subrasante debe compactarse a un grado de compactación de  $100\% \pm 2\%$  con respecto a la prueba AASHTO estándar. Para esta condición, y de acuerdo a los resultados anteriores, el esfuerzo de corte disminuye bruscamente, por tanto, pareciera que desde el punto de vista de esfuerzo de corte, sería mejor tomar como punto de control de la compactación de campo, el contenido de agua para el cual la resistencia es la máxima.

Con respecto al material de terraplén (que corresponde a un limo de baja compresibilidad), el efecto de la reducción del esfuerzo de corte puede explicarse porque a medida que el contenido de agua se incrementa, la cohesión entre partículas se reduce al igual que lo hace la fricción. Por el contrario, para el caso de materiales más granulares, como es el caso de la arena limosa (SM, material de subrasante), al incrementarse el contenido de agua y al aplicarse confinamiento a la muestra, el acomodo entre las partículas genera un incremento en la fricción lo que a su vez incrementa la resistencia al corte.

Es importante recalcar que de todos los resultados anteriores se observa que no existe una combinación única de los factores que se pueden controlar en el equipo giratorio que proporcionen las condiciones óptimas de la pruebas de compactación tradicionales sino que existen varias, por lo tanto, se requerirá de varios estudios adicionales con una mayor cantidad de suelos para que se pueda emitir una recomendación en cuanto a las variables a controlar para compactar suelo con equipo giratorio.

# 4.3.3. Comparativa de las propiedades obtenidas con muestras compactadas en forma dinámica y con equipo giratorio

Uno de los objetivos finales de este trabajo era determinar si existe alguna diferencia en las propiedades obtenidas con muestras compactadas en el equipo giratorio y aquellas obtenidas con muestras compactadas dinámicamente. En este inciso se presentan los resultados obtenidos de la prueba de módulo de resiliencia y los obtenidos en la prueba de compresión simple. Las pruebas en este caso sólo se realizaron para el material de terraplén.

#### 4.3.3.1. Compresión simple

Como ya se explicó en los procedimientos de prueba, la resistencia en compresión se determinó en tres puntos de la curva de compactación: 2% abajo del óptimo, en el óptimo y 2% arriba del óptimo. Las Figuras 4.41, 4.42 y 4.43 muestran los resultados obtenidos.



Figura 4.41 Compresión simple de muestra compactadas 2% abajo del contenido de agua óptimo.



Figura 4.42 Compresión simple de muestra compactadas con contenido de agua óptimo.



Figura 4.43 Compresión simple de muestra compactadas 2% arriba del contenido de agua óptimo.

Las tres gráficas anteriores indican que la resistencia en compresión simple, de las muestras compactadas en el equipo giratorio, siempre es ligeramente menor a la obtenida con muestras compactadas dinámicamente; sin embargo, en cuanto a deformación, las compactadas dinámicamente resisten de igual forma más deformación antes de alcanzar la falla. Por lo tanto, el método de compactación (dinámico o con giratorio) sí afecta la resistencia a la compresión del material, al menos para el suelo de terraplén.

#### 4.3.3.2. Módulo de resiliencia

Otra de las propiedades de gran importancia en el diseño de pavimentos es el módulo de resiliencia. En este caso, al igual que en el caso de la resistencia en compresión simple, el módulo de resiliencia se obtuvo para las tres condiciones mencionadas, 2 % abajo del óptimo, en el óptimo y 2 % arriba del óptimo (con respecto a la prueba Proctor estándar). Las gráficas promedio finales se muestran en la Figuras 4.44, 4.45 y 4.46.



Figura 4.44 Módulos de resiliencia obtenidos con muestras compactadas 2% abajo del contenido de agua óptimo.



Figura 4.45 Módulos de resiliencia obtenidos con muestras compactadas con contenido de agua óptimo.



Figura 4.46 Módulos de resiliencia obtenidos con muestras compactadas 2% arriba de contenido de agua óptimo.

En la Figura 4.44 se ve que cuando las muestras se compactan 2 % por debajo del óptimo, los valores de módulo de resiliencia para los distintos valores de confinamiento y esfuerzo desviador, sí tienen pequeñas diferencias si las muestras se compactan en forma dinámica o en el equipo giratorio. De hecho, las compactadas dinámicamente muestran valores mayores, lo cual quiere decir que las deformaciones recuperables son más pequeñas y la deformación que permanece en el espécimen después de retirar la carga es mayor. Por otro lado, las Figuras 4.45 y 4.46 indican que cuando las muestras tienen un contenido de agua óptimo, o por arriba del óptimo, los módulos de resiliencia que se obtienen son muy similares. Entonces, pareciera que algunas propiedades de los suelos son independientes del método de compactación una vez que las materiales presentan contenidos de agua superiores a los óptimos de compactación.

De acuerdo con los resultados obtenidos, aún se requiere desarrollar más pruebas tanto de compactación como de propiedades con ambos métodos de compactación para que se pueda emitir alguna propuesta para un método nuevo de compactación.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

La compactación de materiales es un proceso que se utiliza en la mayoría de las obras de ingeniería civil. Para su control se requiere llevar a cabo tanto pruebas de laboratorio como de campo; sin embargo, se ha visto que las energías de compactación utilizadas en los procedimientos de laboratorio rara vez son comparables con las energías aplicadas con los equipos de compactación de campo, al igual que los mecanismos de densificación. Por esto, una de las nuevas metodologías que se están estudiando para compactar suelos en laboratorio es utilizando el equipo giratorio. En este trabajo se presentó una investigación sobre este tema y del cual se puede concluir lo siguiente:

- 1. El compactador giratorio es un equipo en el que se pueden controlar diferentes variables para llevar a cabo la compactación de un material, de los cuales se pueden mencionar los siguientes: altura del espécimen, peso volumétrico, ángulo de giro, número de giros, la presión vertical para compactar la muestra, la velocidad de aplicación de los giros, etc. Por lo tanto, se puede estudiar el efecto de estas variables en el comportamiento del peso volumétrico seco y en el esfuerzo de corte registrado durante el proceso de compactación.
- Las curvas de compactación obtenidas para un material en específico, dependen en gran medida de la presión vertical con la cual se compacte, ya que a medida que ésta se incrementa, la curva de compactación se desplaza hacia arriba, es decir, la energía aplicada al material se incrementa.
- Para los dos suelos estudiados, las curvas de compactación obtenidas son muy similares si el número de giros con el que se compacta es de 100 ó 500. Entonces, no es necesario que el material se someta a un número de giros muy alto para obtener la curva, parece que 100 ó 200 giros son suficientes.
- 4. Para el material de terraplén, existen varias combinaciones de las variables estudiadas para poder obtener los óptimos de compactación determinados con las pruebas Proctor estándar. En ningún caso se alcanzó el punto óptimo de la prueba Proctor modifcada.
- 5. Con respecto al peso volumétrico seco, se observa que la velocidad a la que se incrementa este parámetro depende de la presión vertical de compactación. A mayor presión vertical, el peso volumétrico que se alcanza a un cierto número de giros es mayor. Esto sugiere que en la compactación de campo, equipos más pesados tendrán que dar menos pasadas al material para alcanzar el peso volumétrico seco requerido, aunado al hecho de que habrá un cierto número de pasadas para las cuales el peso volumétrico ya no se incrementa.

- 6. Otra característica importante es que para incrementar la energía es más eficiente hacerlo con presión de confinamiento que con número de giros. Aplicado a condiciones de campo, entonces, probablemente sea más rápido alcanzar un peso volumétrico seco incrementando el peso de los equipos que incrementando el número de pasadas de un equipo ligero.
- 7. Con respecto a los esfuerzos de corte, en el caso del material de terraplén, las curvas graficadas sobre el espacio de compactación muestran dos segmentos bien diferenciados. Para contenidos de agua por debajo del óptimo, el esfuerzo de corte se reduce drásticamente a medida que el contenido de agua se incrementa y parece mantenerse constante a partir del óptimo y a contenidos de agua mayores.
- 8. El efecto de la reducción del esfuerzo de corte en el suelo fino quizá se deba a la reducción de la cohesión del material y de la fricción debida al incremento del contenido de agua.
- 9. En el suelo arenoso las curvas de compactación obtenidas con el equipo giratorio no se definieron claramente su forma ya que se presenta flujo de agua en las muestras que se compactan con contenido de agua superiores al óptimo, esto hace que el contenido de agua final se reduzca y, por tanto, el peso volumétrico seco se incremente.
- 10. El esfuerzo de corte en la arena limosa se incrementó a medida que el contenido de agua se incrementó hasta un cierto valor. Este incremento quizá se deba a que la fricción de un material granular se i
- 11.ncrementa con el confinamiento; este efecto también se observa en el parámetro "módulo de resiliencia.
- 12. La resistencia en compresión simple de probetas compactadas con el equipo giratorio y las compactadas dinámicamente sí muestran diferencia. Por lo tanto, la resistencia en compresión simple sí se ve afectada por el método de compactación.
- 13. Los valores de módulo de resiliencia de muestras compactadas en la rama seca de la curva de compactación parecen cambiar con el método de compactación, sin embargo, los módulos obtenidos con probetas compactadas en el óptimo y con contenido de agua superiores parecen ser independientes del método de compactación.

#### Recomendaciones

- 1. Se recomienda estudiar una mayor cantidad de suelos para poder proponer un procedimiento de prueba de compactación con el equipo giratorio.
- 2. Para los materiales granulares quizá se deba verificar algún procedimiento adicional para tomar en cuenta que se presenta flujo de agua.
- 3. Parece prudente evaluar si los especímenes compactados con el equipo giratorio son más homogéneos que los compactados dinámicamente.
- 4. Se puede considerar estudiar el efecto de los dos métodos de compactación experimentados en este trabajo con otras propiedades, por ejemplo, la deformación en carga cíclica, la permeabilidad, entre otros.

## Referencias

AASHTO T-99 y T-180 Moisture density relations of soils.

- Browne, M.J. (2006). Feasibility of using a gyratory compactor to determine compaction chracteristics of soil. Master Science Thesis. Montana State University.
- Camacho Tauta, J.F., Reyes Ortiz, O.J y Méndez González, D.F. (2007). Ensayo de compactación giratoria como alternativa al ensayo de compactación Proctor. Ciencia e Ingenieria Neogranadina. Vol 17-2. pp. 67-81. Bogotá. Colombia.
- Chadboum, B.A., Newcomb, D.E., Soller, V.R., DeSombre, R.A., Luoma, J.A. y Timm, D.H. (1998). An asphalt paving tool for adverse conditions. Reporte MN/RC-1998-18. University of Minnesota. Department of Civil Engineering.
- Fredlund, D., Rahardo, H. (1993). Soil Mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, INC.
- Lee, K., Prezzi, M., Kim, N. (2005). Subgrade Design Parameters from Samples Prepared with Different Compaction Methods. Proof copy [TE/2005/02 3437] 004702QTE.
- Mendoza, M. (1992). Enfoques recientes en la compactación de suelos. Publicación técnica No.33. Instituto Mexicano del Transporte.
- Milberger, L., Dunlap, W. (1966). A gyratory compactor for molding large diameter triaxial specimens of granular materials. Research report number 99-2. Texas Highway department in cooperation with the U.S. Department of Commerce.
- Mokwa, R., Cuelho, E., y Browne, M. (2008). Laboratory Testing of Soil Using Superpave Gyratory Compactor. Transportation Research Board, 2008.
- Norma ASTM C 136-06, Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- Norma ASTM C 702-98, Reducing Samples of Aggregate to Testing Size.
- Norma ASTM D 1140-00, Amount of Material in Soils Finer tan no. 200 (75-µm).
- Norma ASTM D 1557-09, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56 000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2 700 kNm/m<sup>3</sup>)).
- Norma ASTM D 2166-06, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.

- Norma ASTM D 2216-10, Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
- Norma ASTM D 4318-10, Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- Norma ASTM D 698-07e1, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kNm/m<sup>3</sup>)).
- Norma ASTM D 854-10, Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- Ping, W.V., Xing, G., Leonard, M., y Yang, Z. (2003). Evaluation of Laboratory Compaction Techniques for simulating field soil compaction (Phase II). Report No. FL/DOT/RMC/BB-890(F). Florida Department of Transportation.
- Protocolo NCHRP 1-28A. Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design.
- Rico, A. (1992). Algunas divergencias entre prácticas comunes de compactación y lo que la investigación parece indicar. Volumen Raúl J. Marsal. Sociedad Mexicana de mecánica de suelos pp. 265-273.
- Rico, A., Del Castillo, H. (1988). La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Volumen 1 ed. Limusa.
## CIUDAD DE MÉXICO

## SANFANDILA

Av. Nuevo León 210 Col. Hipódromo Condesa CP 06100, México, D F Tel +52 (55) 52 653600 Fax +52 (55) 52 653600

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000 CP 76700, Sanfandila Pedro Escobedo, Querétaro, México Tel +52 (442) 216 9777 Fax +52 (442) 216 9671



INSTITUTO

MEXICANO DE



COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

www.imt.mx publicaciones@imt.mx