



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALIGERAMIENTO DE UN SUELO  
COMPACTADO CON PERLAS DE  
POLIESTIRENO EXPANDIDO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL - GEOTECNIA

PRESENTA:  
**ERICK MÁRQUEZ QUINTOS**

DIRECTOR DE TESIS:  
**DR. MIGUEL PEDRO ROMO ORGANISTA**  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

México, D.F. Marzo de 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Jurado asignado:

Presidente: Dr. Manuel Jesús Mendoza López

Secretario: Dr. Osvaldo Flores Castrellón

Vocal: Dr. Miguel Pedro Romo Organista

1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Eduardo Botero Jaramillo

2<sup>do</sup>. Suplente: Dra. Alexandra Ossa López

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería de la UNAM

TUTOR DE TESIS:

---

DR. MIGUEL PEDRO ROMO ORGANISTA

# Agradecimientos

Al Instituto de Ingeniería, UNAM, por la oportunidad de realizar mi tesis en sus instalaciones.

Al Dr. Miguel P. Romo Organista por compartirme sus conocimientos académicos y por la asesoría en la dirección de esta tesis.

Al Dr. Manuel J. Mendoza López, Dr. Osvaldo Flores Castellón, Dr. Eduardo Botero Jaramillo y Dra. Alexandra Ossa López por sus valiosos aportes y comentarios para esta tesis.

A mi madre, mis hermanos y mi familia por su apoyo incondicional durante mis estudios de maestría.

Al Ing. Raúl López Bretón por sus valiosos consejos.

Al CONACYT por otorgarme una beca durante la realización de mis estudios de posgrado.

A todos mis amigos y compañeros que directa o indirectamente estuvieron involucrados en este trabajo.

# Resumen

En esta tesis se presenta una investigación experimental sobre el aligeramiento de un suelo compactado al integrarle perlas de poliestireno expandido (EPS) a un suelo. La mezcla estuvo constituida por los siguientes elementos: material friccionante (arena sílica), material cohesivo (caolín) y material ligero (perlas de EPS). En donde, se incorporaron las perlas de EPS a un proceso modificado de compactación por impactos. Los experimentos se realizaron en el laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Además, se realiza un ejemplo de aplicación a un terraplén en el que se muestra la disminución de presiones de contacto en el suelo de apoyo.

## *Resultados*

El procedimiento propuesto de compactación por impactos modificado tiene un enfoque sencillo y universal. Este procedimiento fue satisfactorio y los resultados son reproducibles.

En las pruebas de compactación se utilizaron tres energías de compactación. La primera de  $14.57 \frac{\text{kg-cm}}{\text{cm}^3}$ , la segunda de  $18.21 \frac{\text{kg-cm}}{\text{cm}^3}$  y la tercera de  $21.86 \frac{\text{kg-cm}}{\text{cm}^3}$ . Las proporciones de las perlas de poliestireno expandido en contenidos de volumen fueron: 0, 25, 50, 75 y 100 % (en peso de suelo son: 0, 0.311, 0.608, 0.919, 1.261 % respectivamente). De esta forma, se disminuye el peso volumétrico compactado hasta en un 35 %.

La aplicación de la mezcla suelo-perlas de EPS se idealizó para un terraplén con un talud 2:1 (H:V) y una altura 3.5 m, desplantado sobre un suelo compresible; se analizaron los asentamientos elásticos y por consolidación mediante un programa de diferencias finitas. Los resultados muestran el beneficio de la utilización de la mezcla de suelo-perlas de poliestireno expandido, ya que los asentamientos disminuyen hasta en un 45 %.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>i</b>
<b>Índice general</b>	<b>ii</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>v</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>ix</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
Planteamiento del problema y alcances de la tesis . . . . .	1
Objetivo general . . . . .	2
Objetivo particular . . . . .	2
Contenido de la tesis . . . . .	2
<b>1. Compactación de suelos: Antecedentes</b>	<b>4</b>
1.1. Aspectos generales . . . . .	4
1.2. Objetivos de la compactación de laboratorio . . . . .	6
1.3. Curva de compactación . . . . .	6
1.4. Algunos factores que afectan la compactación . . . . .	8
1.5. Algunos aspectos que influyen en la compactación . . . . .	9
<b>2. Poliestireno expandido</b>	<b>13</b>

2.1.	Introducción . . . . .	13
2.2.	Proceso de fabricación del poliestireno expandido . . . . .	13
2.2.1.	Pre-expansión . . . . .	14
2.2.2.	Producto final . . . . .	15
2.3.	Comportamiento esfuerzo-deformación del bloque de EPS . . . . .	16
2.3.1.	Compresión simple . . . . .	16
2.3.2.	Cargas cíclicas . . . . .	17
2.3.3.	Relación de <i>Poisson</i> . . . . .	18
2.3.4.	<i>Creep</i> o fluencia lenta del material . . . . .	19
2.3.5.	Modelos constitutivos de bloques de poliestireno expandido . . . . .	20
2.3.6.	Reciclado del poliestireno expandido . . . . .	21
2.4.	Aplicaciones de bloques de poliestireno expandido . . . . .	22
2.4.1.	Inclusiones compresibles . . . . .	22
2.4.2.	Disminución de ruido y amortiguamiento de vibraciones . . . . .	23
2.4.3.	Aislamiento térmico . . . . .	24
2.4.4.	Rellenos ligeros . . . . .	24
2.4.5.	Aspectos fundamentales para el diseño con EPS . . . . .	25
2.5.	Perlas de poliestireno expandido . . . . .	26
<b>3.</b>	<b>Compactación de la mezcla arena-caolín-perlas de EPS</b>	<b>29</b>
3.1.	Aspectos generales . . . . .	29
3.2.	Materiales . . . . .	30
3.2.1.	Arena sílica . . . . .	30
3.2.2.	Caolín . . . . .	31
3.2.3.	Perlas de poliestireno expandido . . . . .	32
3.3.	Equipo de compactación . . . . .	32

3.3.1. Molde y pisón . . . . .	32
3.4. Compactación por impactos en el laboratorio . . . . .	34
3.4.1. Procedimiento de pruebas de compactación por impactos sin perlas de poliestireno expandido . . . . .	35
3.4.2. Procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de poliestireno expandido . . . . .	38
3.5. Resultados ilustrados de los procesos de compactación . . . . .	40
3.5.1. Espécimen con una mezcla de suelo con 0 % EPS . . . . .	41
3.5.2. Especímenes con una mezcla de suelo con 25 % EPS . . . . .	42
3.5.3. Espécimen con una mezcla de suelo con 50 % EPS . . . . .	44
3.5.4. Espécimen con una mezcla de suelo con 75 % EPS . . . . .	45
3.5.5. Especímenes con una mezcla de suelo con 100 % EPS . . . . .	46
3.5.6. Análisis y discusión de los resultados . . . . .	47
<b>4. Resultados de la compactación por impactos</b>	<b>50</b>
4.1. Introducción . . . . .	50
4.2. Análisis y discusión de los resultados . . . . .	51
4.2.1. Resultados de las pruebas de compactación sin perlas de EPS . . . . .	51
4.2.2. Resultados de las pruebas de compactación con perlas de EPS . . . . .	52
<b>5. Aplicación de mezclas de suelo-perlas de EPS en un terraplén</b>	<b>59</b>
5.1. Introducción . . . . .	59
5.1.1. Leyes constitutivas empleadas . . . . .	59
5.2. Caso de aplicación a un terraplén . . . . .	60
5.3. Análisis y discusión de los resultados . . . . .	62
<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>65</b>
<b>Referencias</b>	<b>67</b>



# Índice de figuras

1.1. Curva típica de compactación . . . . .	7
1.2. Curva de compactación obtenida en prueba por impactos en arenas limpias y gravas arenosas . . . . .	8
1.3. Efecto del contenido de agua inicial del material por compactar . . . . .	10
1.4. Efecto del tiempo de curado sobre las curvas de compactación por amasado en el molde . . . . .	10
1.5. Efecto del tiempo de reposo sobre la resistencia a la compresión simple en suelos compactados . . . . .	11
1.6. Efecto de pared en suelos compactados . . . . .	11
1.7. Efecto de escala. Variación de la resistencia a la compresión simple con el contenido de agua de compactación . . . . .	12
2.1. Vista de perlas expandibles y expandidas . . . . .	14
2.2. Comportamiento esfuerzo-deformación de un bloque de EPS . . . . .	17
2.3. Comportamiento cíclico de un bloque de EPS . . . . .	18
2.4. Distribución de la relación de <i>Poisson</i> en función de las densidades y el esfuerzo de confinamiento . . . . .	18
2.5. Evolución de las deformaciones por <i>creep</i> . . . . .	19
2.6. Esfuerzo desviador contra deformación axial para varios esfuerzos confinantes. Las curvas experimentales se representan con líneas continuas. Los resultados del modelo se representan con líneas discontinuas . . . . .	20
2.7. Comparación con otros modelos en estado no confinado . . . . .	21
2.8. Descripción del proceso de modificación de residuos de EPS . . . . .	21

2.9. Curva de compactación con MEPS . . . . .	22
2.10. Inclusiones compresibles . . . . .	23
2.11. EPS como aislante térmico . . . . .	24
2.12. Estructuras de pavimento . . . . .	25
2.13. Componentes principales de un terraplén aligerado con bloques de EPS . . . . .	25
2.14. Curvas esfuerzo-deformación con contenidos diferentes de EPS (PS/S) . . . . .	26
2.15. Resistencia a la compresión-deformación con contenidos diferentes de EPS ( $A_E$ )	26
2.16. Comparación de los módulos de curvas de reducción bajo diferentes relaciones de esfuerzo cíclico . . . . .	27
2.17. Modelo esfuerzo-deformación visto para un contenido de 0.5 % de EPS en peso	27
2.18. Curvas esfuerzo deformación en mezclas de arena limosa-perlas de EPS . . . . .	28
3.1. Arena sílica . . . . .	30
3.2. Caolín . . . . .	31
3.3. Perlas de EPS . . . . .	32
3.4. Molde I de I modificado . . . . .	33
3.5. Vista del pisón . . . . .	34
3.6. Proceso para preparar el material, previo a la compactación . . . . .	36
3.7. Secuencia de impactos . . . . .	36
3.8. Secuencia del molde . . . . .	37
3.9. Proceso para preparar la mezcla suelo-perlas de EPS previo a la compactación .	39
3.10. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 0 % de perlas de EPS, en volumen	41
3.11. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 25 % de perlas de EPS en volu- men y un contenido de agua de 5 % . . . . .	42
3.12. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 25 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 7 % . . . . .	43
3.13. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 25 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 9 % . . . . .	43

3.14. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 25 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 11 % . . . . .	43
3.15. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 50 % de perlas de EPS ,en volumen y un contenido de agua de 11 % . . . . .	44
3.16. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 75 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 11 % . . . . .	45
3.17. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 100 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 5 % . . . . .	46
3.18. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 100 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 7 % . . . . .	46
3.19. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 100 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 9 % . . . . .	47
3.20. Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 100 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 11 % . . . . .	47
4.1. Curva de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20 % de finos . . . . .	52
4.2. Curva de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20 % de finos con 25 % de perlas de EPS en volumen . . . . .	53
4.3. Curva de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20 % de finos con 50 % de perlas de EPS en volumen . . . . .	53
4.4. Curva de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20 % de finos con 75 % de perlas de EPS en volumen . . . . .	54
4.5. Curva de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20 % de finos con 100 % de perlas de EPS en volumen . . . . .	54
4.6. Curvas de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20 % de finos y con diferentes contenidos de perlas de EPS en donde se utilizaron tres energías de compactación . . . . .	55
4.7. Línea de tendencia con mínimos cuadrados para ambos procesos de compactación por impactos . . . . .	56
5.1. Terraplén simétrico propuesto . . . . .	60
5.2. Modelo propuesto para el cálculo de asentamientos en el programa FLAC . . . . .	62

5.3. Asentamientos elásticos del terraplén para diferentes contenidos de perlas de EPS, en volumen . . . . .	63
5.4. Asentamientos por consolidación del terraplén para diferentes contenidos de perlas de EPS, en volumen . . . . .	63
5.5. Asentamientos totales del terraplén para diferentes contenidos de perlas de EPS, en volumen . . . . .	64

# Índice de tablas

2.1. Densidades de bloques de EPS de acuerdo a las normas ASTM . . . . .	15
3.1. Propiedades granulométricas de la arena sílica . . . . .	31
3.2. Propiedades índice del caolín . . . . .	31
3.3. Proporciones en volumen o peso de perlas de EPS para la mezcla (arena-caolín) con un peso de 222 g. . . . .	38
3.4. Resumen general de los procedimientos de compactación por impactos sin y con EPS para las energías de compactación de: 18.21 y 21.86 $\frac{kg-cm}{cm^3}$ . . . . .	49
4.1. Resultados del $\gamma_d$ en los procesos de compactación por impactos en la zona óptima (contenido de agua del 11 %) . . . . .	57
4.2. Resultados del $\gamma_m$ en los procesos de compactación por impactos en la zona óptima (contenido de agua del 11 %) . . . . .	57
5.1. Estratigrafía propuesta . . . . .	61
5.2. Presiones de contacto al centro del terraplén . . . . .	61
5.3. Resultados de asentamientos al centro del terraplén . . . . .	62
5.4. Disminución de asentamientos al centro del terraplén, respecto al suelo natural compactado . . . . .	64

# Introducción

## Planteamiento del problema y alcances de la tesis

La necesidad de construir obras civiles compactadas que son generalmente estructuras térreas sobre suelos blandos o altamente compresibles como ocurren en el Valle de México o en otras partes del mundo con suelos similares resulta ser un problema geotécnico debido a que presentan asentamientos o hundimientos bastante considerables. Debido a esto es necesario nivelar las estructuras con más suelo compactado (más peso) hasta la altura inicial. Además, el mantenimiento para este tipo de estructuras es muy periódico por que regularmente presentan agrietamientos y fisuras. Una experiencia es el Lago Nabor Carrillo donde los bordos están desplantados sobre suelos altamente compresibles y los asentamientos son muy considerables, es decir, se miden en metros.

Desde hace un poco más de tres décadas, en algunos países como Alemania, Bélgica, Canadá, E.U.A., Finlandia, Francia, Japón, Noruega, Reino Unido y Suiza, empezaron a utilizar el poliestireno expandido [*Expanded PolyStyrene* (EPS)] para crear estructuras o rellenos con pesos volumétricos muy bajos comparados con un suelo natural compactado. El uso de EPS es cada vez más frecuente en todo el mundo debido a su buen comportamiento mecánico.

Por otro lado, en México las aplicaciones del EPS en problemas geotécnicos son limitadas; es por esto que en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se ha iniciado el estudio del comportamiento del EPS. Ossa *et al.* [1, 2, 3, 4], muestran resultados de investigaciones sobre el EPS en aspectos como: la microestructura, el comportamiento esfuerzo-deformación, la caracterización dinámica del EPS y la aplicación de perlas de EPS en el aligeramiento de terraplenes en suelos compresibles.

Esta tesis se realizó con un método experimental en el laboratorio de mecánica de suelos con el fin de integrar a una mezcla de suelo las perlas de EPS en diferentes proporciones, para obtener como resultado la disminución del peso volumétrico compactado respecto a un suelo natural compactado y así observar el efecto que se tiene al utilizar diferentes contenidos de perlas de EPS. Finalmente con los resultados experimentales de la mezcla de suelo-perlas de EPS, se propone un terraplén desplantado sobre un suelo idealizado similar al del Valle de México, en donde se muestra el beneficio de utilizar dicha mezcla.

## Objetivo general y alcances

El propósito de esta tesis es investigar la disminución en el peso volumétrico de una mezcla de materiales la cual se compone de: arena sílica, caolín y perlas de EPS. Para esto se utilizaron diferentes proporciones de perlas de EPS en contenidos de volumen, que fueron: 0, 25, 50, 75 y 100 %.

## Objetivos específicos

1. Modificar algunas etapas al proceso de compactación por impactos estándar para realizar especímenes con mezcla de suelo-perlas de EPS, utilizando tres variables: la energía específica ( $E_e$ ), el contenido de agua ( $\omega$ ) y diferentes porcentajes de perlas de EPS.
2. Estudiar el efecto del peso volumétrico compactado de un suelo natural respecto a la mezcla de suelo-perlas de EPS y así obtener una tendencia que caracterice la mezcla de suelo perlas de EPS.
3. Proponer el análisis de un terraplén con base en los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de laboratorio y realizar una simulación de asentamientos elásticos y por consolidación al 100 % en el suelo donde se apoya el terraplén.

## Organización y contenido de la tesis

La tesis está organizada en cinco capítulos. Se describe el contenido de cada uno de ellos a continuación:

Capítulo 1. **Compactación de suelos: Antecedentes:** Este capítulo presenta una breve descripción de la compactación de suelos. Posteriormente, se mencionan algunos tipos de pruebas de compactación en el laboratorio. Además se menciona la importancia de las pruebas de compactación en el laboratorio y se describen algunos factores y efectos importantes que se presentan en las pruebas de compactación.

Capítulo 2. **Poliestireno expandido:** Este capítulo presenta aspectos generales del poliestireno expandido (EPS). Se muestra una breve descripción del EPS, se describe el procedimiento de fabricación del producto, algunas de las propiedades que lo caracterizan, el comportamiento que presenta cuando es sometido a pruebas de laboratorio, así como las aplicaciones, recomendaciones y algunas de las nuevas propuestas para su uso en el futuro.

- Capítulo 3. **Compactación de la mezcla arena-caolín-perlas de EPS:** Este capítulo presenta una breve reseña de los materiales y el equipo de compactación que se utiliza en el laboratorio para esta tesis. Además se describe el procedimiento de compactación por impactos modificado que se caracteriza por utilizar una mezcla de suelo con perlas de EPS.
- Capítulo 4. **Resultados de la compactación por impactos:** Este capítulo presenta los resultados de los procedimientos de compactación por impactos para una mezcla de suelo sin perlas de EPS y para una mezcla de suelo con perlas de EPS en diferentes proporciones. Los resultados experimentales indican una tendencia que puede caracterizar una parte del comportamiento de la mezcla suelo-perlas de EPS.
- Capítulo 5. **Aplicación de mezclas de suelo-perlas de EPS en un terraplén:** Este capítulo consiste en analizar con un programa de diferencias finitas los asentamientos inmediatos y por consolidación de un terraplén con la mezcla de suelo-perlas de EPS; el terraplén simétrico se desplanta sobre un suelo altamente compresible típico de la ciudad de México. Los resultados obtenidos muestra un beneficio al utilizar la mezcla de suelo-perlas de EPS.



# Capítulo 1

## Compactación de suelos: Antecedentes

El objetivo del capítulo es presentar un panorama general de la compactación en campo y la relación que existe con las pruebas de laboratorio efectuadas en suelos con diferentes características. Se menciona la importancia que existe entre algunos factores y efectos asociados a los procedimientos de la compactación de suelos realizados en el laboratorio.

### 1.1. Aspectos generales

Debe considerarse a la compactación como un proceso que involucra diversos factores externos que modifican el arreglo o la estructura primaria; entre esos factores se pueden citar la energía, el método y el procedimiento de compactación. Luego entonces, la compactación es un procedimiento modificador de la estructura primaria del suelo, y por tanto un importante factor en el comportamiento mecánico macroscópico del suelo compactado. Al utilizar métodos diferentes de compactación se obtienen estructuras diferentes y con ello propiedades diferentes, incluso con el mismo peso volumétrico seco e igual grado de saturación. [5].

Es claro que la compactación no mejora sistemáticamente todas las propiedades mecánicas e hidráulicas de interés ingenieril, y que debe distinguirse explícitamente la o las que se busca mejorar, aun a costa de que se deterioren otras. Es decir, la compactación es un medio para alcanzar ciertos fines específicos, y no como un fin en sí misma. A continuación se mencionan las principales razones que se persiguen con la compactación en el campo:

- Reducir compresibilidad
- Aumentar resistencia cortante
- Reducir deformabilidad
- Reducir permeabilidad

- Lograr estabilidad volumétrica
- Lograr la permanencia de propiedades
- Alcanzar homogeneidad
- Lograr ductilidad
- Mínimo costo posible

Los métodos de compactación utilizados en épocas remotas fueron el andar de las personas y/o animales, maderos pesados, cilindros o rodillos sobre el suelo; sin embargo, los resultados del costo-trabajo-beneficio fueron excesivos comparados con los resultados. No obstante construían grandes obras civiles como: las pirámides, la red de antiguos caminos mayas, obras hidráulicas, entre otras.

Un ejemplo en la República Mexicana de la compactación de suelo es conocido como Presa Purrón o Presa de Mequitongo, siendo ésta un ícono representativo de una presa de tierra, ésta se encuentra en la meseta poblana, lugar donde se construyó una presa de almacenamiento para captar el flujo de una corriente efímera, un poco más allá del Valle de Tehuacán; su construcción inició entre 750 y 600 a.C. [6].

Con el correr del tiempo, el hombre fue mejorando sus herramientas rudimentarias y alejando el uso de animales para empezar a disponer de herramientas y máquinas, así con los conocimientos adquiridos por el empirismo que persiste en la actualidad, los primeros constructores fueron sistematizando y estandarizando procedimientos de compactación.

En el año de 1933 Proctor, el precursor de la compactación publicó cuatro artículos [7, 8, 9, 10], en estas investigaciones se establecen los conceptos y la relación que existe entre el peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ ), contenido de agua en la compactación ( $w_c$ ) y energía de compactación ( $E_c$ ). Así mismo, Proctor definió la prueba de compactación que es denominada como *Proctor estándar*. Proctor también realizó una comparativa de los resultados de campo y los métodos de laboratorio propuestos.

Como es conocido, las técnicas de compactación se aplican a prácticamente cualquier obra civil como pueden ser: muelles, bordos, puentes, presas, diques, terraplenes, aeropuertos, muros de retención y además, en algunas ocasiones es necesario compactar el terreno natural, como en el caso de las cimentaciones. Así la compactación es un reto constructivo de campo. Quizá el reto mayor es estandarizar un método que reproduzca el proceso de compactación de campo en el laboratorio.

Los procesos de compactación mecánica son reconocidos como el medio de estabilización más eficaz y económico para mejorar las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos en el campo. Es por esto que las pruebas de compactación en laboratorio representan una reproducción aproximada del proceso de compactación en campo.

A partir de que Proctor desarrolló su prueba, han aparecido otras pruebas, las cuales se pueden clasificar de acuerdo a lo siguiente:

- Pruebas dinámicas o impactos
- Pruebas estáticas
- Pruebas por amasado
- Pruebas por vibración
- Pruebas mixtas

## 1.2. Objetivos de la compactación de laboratorio

Mendoza [5] propone dos objetivos claros en la compactación de laboratorio que son los siguientes:

- Representar las condiciones de compactación mediante especímenes para conocer *a priori* las propiedades mecánicas o hidráulicas de los suelos compactados para una futura obra.
- Tener un control de calidad en la compactación de campo, al comparar la densificación lograda con la obtenida con el patrón estándar de compactación adoptada para el caso.

Estas premisas se cumplen si los procedimientos de compactación en el laboratorio sobre muestras alteradas, permiten reproducir o asemejar las condiciones de la compactación de campo; esto es, se debe cumplir con el principio de representatividad.

Diferentes métodos de compactación en el laboratorio realizan la densificación de suelos por diferentes mecanismos. La compactación estática tiene el efecto de acercar los granos, partículas o grumos con pocas distorsiones, en tanto que la compactación por amasado, y en menor proporción la de impactos que induce fuertes distorsiones o amasamiento al suelo. El tipo de compactación más usual es el de impactos.

## 1.3. Curva de compactación

La compactación implica el aumento de partículas sólidas por unidad de volumen, por lo cual es necesario expresar los resultados de la compactación en términos del peso de esa fracción mineral sólida por unidad de volumen; este cociente no es otra cosa que el peso volumétrico seco,  $\gamma_d$ .

Proctor en su primer artículo [7] trata de establecer alguna correlación entre los procesos de compactación y el aumento del peso volumétrico seco del suelo compactado, hasta proponer y representar el proceso de compactación por medio de una gráfica en la que se observa el cambio del peso volumétrico seco en función del contenido de agua. Asimismo, al realizar diferentes procesos de compactación para el mismo suelo, da como resultado diferentes curvas de compactación ya sea en campo o en laboratorio [8, 9].

Por el proceso descrito anteriormente, esta curva recibe el nombre de curva de compactación; además de ser el medio gráfico más usual de hoy en día, aunque puede haber otras formas de representar el proceso de compactación.

Regularmente la curva de compactación como la que se observa en la figura 1.1, presenta un máximo; este punto se le conoce como peso volumétrico seco máximo; y el contenido de agua con el que se consigue se denomina contenido de agua óptimo y representa el contenido de agua donde se observa que en el procedimiento de compactación del suelo produce una eficiencia máxima.

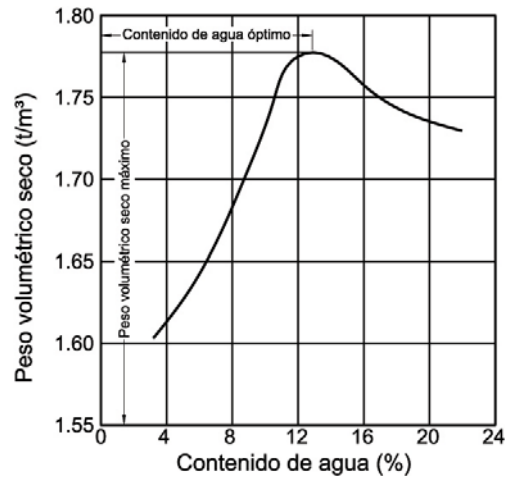


Figura 1.1: Curva típica de compactación [11]

La curva  $\gamma_d-w$  se dibuja a partir de la expresión 1.1 que se presenta a continuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + w} \quad (1.1)$$

en donde:

- $\gamma_d$  = peso volumétrico seco
- $\gamma_m$  = peso volumétrico húmedo
- $w$  = contenido de agua

Cuando se realiza una prueba de compactación por impactos a las arenas sin finos; la curva de compactación presenta una forma como se observa en la figura 1.2. En la cual no se define ni un peso volumétrico seco máximo ni un contenido de agua óptimo. Sin embargo, existen otras pruebas más representativas y aplicables como las pruebas por vibración a este tipo de suelos (arenas limpias o mezclas de arenas y gravas sin finos).

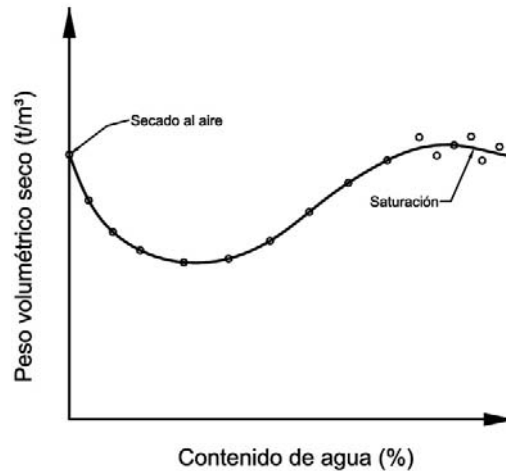


Figura 1.2: Curva de compactación obtenida en prueba por impactos en arenas limpias y gravas arenosas [11]

Es claro que la distribución granulométrica de cada suelo, la forma y mineralogía de sus granos o partículas, la densidad de sólidos y sus propiedades plásticas, determinan resultados muy disímiles. Esto muestra la importancia que tiene la determinación experimental de la curva de compactación para cada suelo en particular [5].

## 1.4. Algunos factores que afectan la compactación

En el proceso de la compactación del suelo obtenemos diferentes resultados, esto se debe a que el suelo es un material natural que presenta distintas propiedades físicas, químicas y mecánicas, aun para el mismo tipo de suelo.

De una multiplicidad de factores que depende el proceso de compactación, los principales son cuatro y se mencionan a continuación:

- **Naturaleza del suelo.** Debido a que la microestructura es diferente para cada suelo.
- **Método de compactación.** Los tres tipos de compactación más usuales en el laboratorio que son: por impactos, por amasado y por aplicación de carga estática. En cada uno de los procesos se ocupan diferentes herramientas y aparatos.

En teoría, estos métodos de compactación tienden a reproducir las condiciones de campo, pero en la mayoría de los casos no es fácil realizar una reproducción exacta entre laboratorio y campo.

- **Energía específica.** La que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante algún proceso mecánico. En este estudio se utiliza la expresión 1.2, que se menciona a continuación:

$$E_e = \frac{NnWh}{V} \quad (1.2)$$

en donde:

$E_e$  = energía específica, ( $\frac{kg-cm}{cm^3}$ )

$N$  = número de golpes del pisón compactador en cada una de las capas en que se acomoda el suelo en el molde de compactación

$n$  = número de capas que se dispone hasta llenar el molde

$W$  = peso del pisón compactador

$h$  = altura de caída del pisón al aplicar los impactos al suelo

$V$  = volumen total del molde de compactación, igual al volumen total del suelo compactado

- **Contenido de agua del suelo.** En su primer artículo, Proctor [7] hace la observación que para contenidos crecientes de agua, a partir de valores bajos, se obtenían más altos pesos específicos secos para el material compactado, si se utiliza la misma energía de compactación, pero también observó que cuando la humedad pasa de cierto valor, disminuyen los pesos específicos secos logrados. Es decir, que para un suelo dado y utilizando determinado procedimiento de compactación, llamado el óptimo, que produce el máximo peso volumétrico seco que es posible obtener con algún procedimiento de compactación.

## 1.5. Algunos aspectos que influyen en la compactación

Alberro *et al.* [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18] y Mendoza [19] observaron que existen algunas condiciones del material que están relacionadas con el procedimiento de compactación en la preparación de la muestra y en el tamaño del molde. Sólo se muestran cinco aspectos que influyen en el proceso de compactación y que se toman en cuenta para esta tesis, estos se mencionan a continuación:

- **Contenido de agua inicial del suelo.** Alberro *et al* [12] observaron que particularmente en los suelos finos como los residuales y monmoriloníticos forman grumos y genera una granulometría diferente respecto a la inicial, sobre todo cuando se secan, es por esto que en las pruebas de compactación de laboratorio varíen en caso de alterar el contenido de agua del material almacenado. En la figura 1.3 se muestra el efecto del contenido de agua inicial en las curvas de compactación.

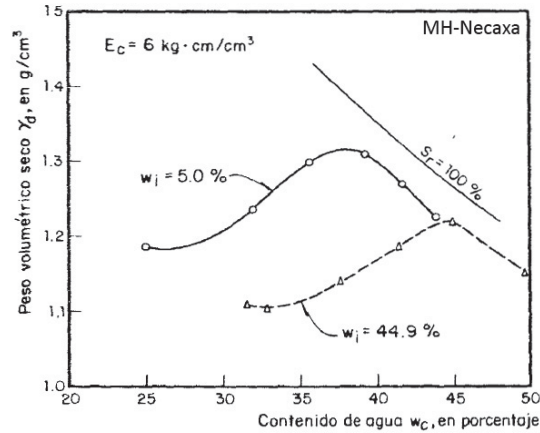


Figura 1.3: Efecto del contenido de agua inicial del material por compactar [12]

- **Tiempo de curado.** Lapso comprendido entre el momento que se agrega agua y se compacta el suelo (ver fig. 1.4).

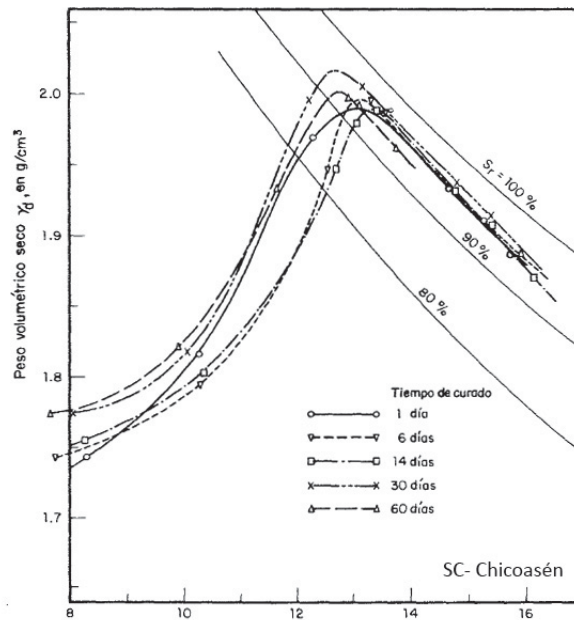


Figura 1.4: Efecto del tiempo de curado sobre las curvas de compactación por amasado en el molde [12]

- **Tiempo de reposo.** Lapso transcurrido entre el momento de la compactación y el inicio de la prueba de resistencia (ver fig. 1.5).

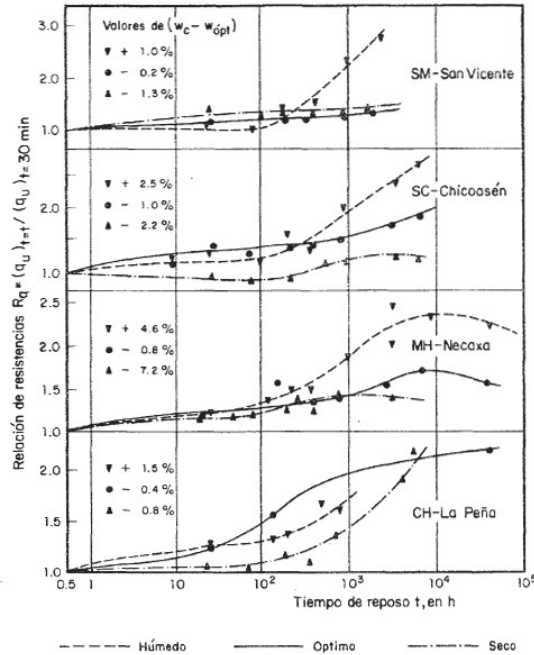


Figura 1.5: Efecto del tiempo de reposo sobre la resistencia a la compresión simple en suelos compactados [12]

Alberro *et al.* [15, 16], también observaron el efecto que tiene el molde y proponen lo siguiente:

- Efecto de pared y tamaño de los gruesos.** Los resultados de la compactación en el laboratorio para suelos cohesivos influyen en los resultados de la relación que existe entre el diámetro del molde de compactación,  $D$ , y el tamaño máximo de las partículas,  $T_{max}$ . Dicho efecto de pared ocasiona un incremento de la relación de vacíos del material en la cercanía de las paredes del molde y la consecuente reducción del peso volumétrico seco de la muestra compactada (ver fig. 1.6). Para relaciones  $D/T_{max} > 7.6$ , el efecto de pared desaparece [12].

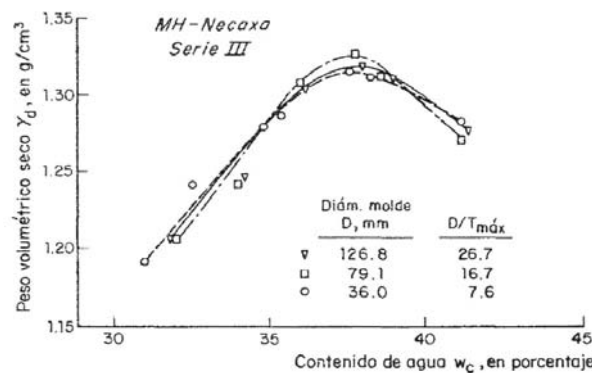


Figura 1.6: Efecto de pared en suelos compactados [12]



- Efectos de escala.** Este efecto tiene mayor incidencia sobre los especímenes cada vez más grandes. Al aumentar el tamaño de estos, se incrementa la probabilidad de defectos y debilidades que favorezca la falla. Alberro, recomienda que se usen moldes y granulometrías de grumos tales que la relación  $D/T_{max}$  sea de por lo menos 10, para no sobre estimar la resistencia en el laboratorio por los efectos de escala (ver fig. 1.7).

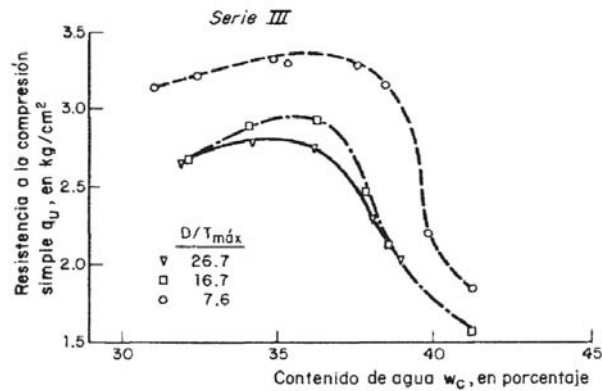


Figura 1.7: Efecto de escala. Variación de la resistencia a la compresión simple con el contenido de agua de compactación [12]

- Efecto de esbeltez.** Para evitar efectos tales como pandeo, modos inusuales de falla, o planos de corte inducidos, la relación de altura/diámetro del molde debe ser  $< 2$  [19].

# Capítulo 2

## Poliestireno expandido

Este capítulo aborda de manera general algunas de las características particulares y generales del EPS como son: su fabricación y algunas de sus propiedades.

### 2.1. Introducción

El EPS se ha caracterizado por ser uno de los geosintéticos más utilizados en la ingeniería geotécnica durante los últimos 30 años alrededor del mundo. Una razón de utilizar el *geofoam* (en inglés) o geoespuma de EPS se debe a que el peso volumétrico es aproximadamente 100 veces más ligero que un suelo [20]. En la actualidad el *geofoam* está catalogado en la categoría de los geosintéticos.

Horvarth es uno de los pioneros en la investigación del *geofoam* y lo describe como una amplia gama de productos celulares cerrados [20]. La mayoría de las aplicaciones de geoespumas se utilizan bloques moldeados [21].

### 2.2. Proceso de fabricación del poliestireno expandido

El principal elemento del EPS son perlas o resinas de poliestireno expandible y en su interior contienen un agente expansor que comúnmente es pentano. Las perlas de poliestireno expandible son esferas con un diámetro en el intervalo de 0.2 mm a 0.3 mm. El pentano se dispersa por todo el poliestireno durante el proceso de fabricación. Además de pentano es posible incorporar otros aditivos opcionales durante la manufactura del poliestireno expandible. Las perlas son translúcidas y tienen una consistencia sólida con una gravedad específica ligeramente mayor que uno. Al final de este proceso, se obtienen perlas de poliestireno expandido.

El poliestireno expandido se denomina coloquialmente como perlas o resinas con forma esférica, con un diámetro en el intervalo de 2 a 3 mm. Las perlas se clasifican en varios rangos de tamaño para usarlos en las máquinas moldeadoras. El tamaño de la perla no afecta a las propiedades mecánicas geotécnicamente pertinentes o de los productos finales (EPS). Sin embargo, sí afecta la apariencia del EPS y por tanto afecta las propiedades térmicas de dicho material.

Se hace la siguiente mención para señalar y evitar alguna confusión en la práctica: La similitud en la terminología de la resina (poliestireno expandible) como se observa en la figura 2.1 (a) y acabado el producto (EPS) como se observa en la figura 2.1 (b).



(a) Poliestireno expandible



(b) Poliestireno expandido

*Figura 2.1: Vista de perlas expandibles y expandidas*

El procedimiento de fabricación del EPS consta de los siguientes procesos: la pre-expansión y el producto final. Estos procesos se describen en 2.2.1 y 2.2.2, respectivamente.

### 2.2.1. Pre-expansión

El poliestireno expandible se envía generalmente a grandes cajas selladas, para la máquina moldeadora. Existen dos tipos de moldes que se mencionan a continuación:

- Una máquina de moldes para hacer bloques prismáticos relativamente grandes en forma de paralelepípedo.
- Una máquina moldeadora para hacer formas específicas tales como vasos para bebidas.

La primera etapa del molde se denomina pre-expansión. Esto implica que las perlas se calientan con un vapor entre 80 y 110°C en un recipiente llamado pre-expansor que puede estar cerrado o abierto a la atmósfera. La calefacción simultáneamente suaviza el poliestireno y se evapora el pentano que hace que cada perla se logre expandir hasta 50 veces; originalmente el sólido se transforma en una esfera celular con una superficie exterior lisa (piel) y que contiene en un gran número células cerradas. De esta manera, el poliestireno forma paredes celulares. En algunos lugares las esferas celulares se les conocen como *pre-puff*, o perlas de EPS.

La expansión de las perlas en un lote es esencialmente el mismo, sin embargo debido a que las perlas pueden tener variación en su diámetro, el resultado también tiene un rango de variación.

Estas perlas son llevadas a la máquina de moldes para su expansión adicional y conformarla en el producto final.

### 2.2.2. Producto final

El producto final más común se denomina bloque de EPS y se desarrolla mediante la colocación de perlas de EPS en un molde de pared de acero. Los tamaños del molde no son estándar especialmente en el espesor. Algunas propiedades de los bloques de poliestireno expandido son las siguientes:

- Densidad:** La densidad de los bloques de EPS es considerada una propiedad principal. La resistencia a la compresión, tensión, flexión, comportamiento de fluencia lenta, y otras propiedades mecánicas están en función de dicho parámetro. En la tabla 2.1 se presenta la denominación de acuerdo a las normas *American Society for Testing and Materials* (ASTM) [22, 23], que da al EPS en función de la densidad.

Tabla 2.1: Densidades de bloques de EPS de acuerdo a las normas ASTM

Tipo ASTM D-6817-07	Densidad (kg / m <sup>3</sup> )	Tipo ASTM C-578-10
EPS12	11.2	XI
EPS15	14.4	I
EPS19	18.4	XII
EPS22	21.6	II
EPS29	28.8	VI
EPS39	38.4	XIV
EPS46	45.7	XV

Las dimensiones de los bloques de EPS utilizados en aplicaciones geotécnicas van desde las inclusiones compresibles, el ruido y amortiguamiento de vibraciones, aislamiento térmico y rellenos ligeros que se describen en la sección 2.4, esto aunado al bajo peso del material que facilita el transporte y la colocación en campo. Cabe mencionar que un bloque de EPS con las siguientes dimensiones: 0.6 m X 1.2 m X 2.4 m presenta un peso promedio de 35 kg y una densidad de  $20 \text{ kg/m}^3$ , es decir, este puede ser transportado e instalado fácilmente por dos personas en un periodo de tiempo corto.

En las aplicaciones prácticas a la geotecnia los bloques de EPS se pueden manejar fácilmente después de su fabricación, durante el transporte o la colocación en campo. Dos personas pueden manejar un bloque de 0.6 m X 1.2 m X 2.4 m y con un peso promedio de 35 kg y una densidad de  $20 \text{ kg/m}^3$ .

## 2.3. Comportamiento esfuerzo-deformación del bloque de EPS

### 2.3.1. Compresión simple

Investigaciones anteriores han dado a conocer resultados de pruebas de compresión simple (no confinada,  $\sigma_3 = 0$ ) para bloques de EPS bajo una carga rápida [20, 24, 25]. La mayoría de estos resultados se han obtenido con una velocidad de deformación de 10 % por minuto, hasta el nivel de deformación deseada.

El comportamiento esfuerzo-deformación del bloque de EPS se divide en tres zonas tal como se muestra en la figura 2.2.

**Zona 1. Comportamiento lineal inicial:** El comportamiento esfuerzo de compresión-deformación de los bloques de EPS es lineal y elástico hasta deformaciones del orden del 1 %. Además, la pendiente inicial (aproximadamente) es una parte lineal de la curva esfuerzo-deformación (Zona 1), que está definida por la *tangente inicial* o *Módulo de Young*,  $E_i$ .

**Zona 2. Comportamiento plástico:** En esta zona el material presenta un comportamiento plástico que está definido por el esfuerzo de fluencia,  $\sigma_y$ . La zona tiene un rango de deformación de hasta 70 %, además de presentar una pendiente,  $E_p$ , que se define como módulo de plasticidad. Esta zona se caracteriza porque ocurre el colapso de la estructura celular cerrada [1]. En esta etapa, las deformaciones son irreversibles y muestran una pérdida en el volumen de la muestra.

**Zona 3. Densificación:** En esta zona se presentan deformaciones mayores al 70 %, es visible la pérdida de volumen del material, sin embargo, las deformaciones laterales son menores o imperceptibles a la vista.

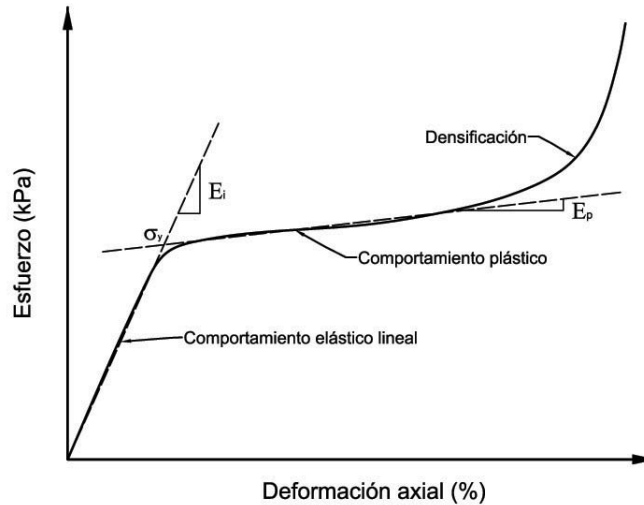


Figura 2.2: Comportamiento esfuerzo-deformación de un bloque de EPS [26]

### 2.3.2. Cargas cíclicas

Las investigaciones reportadas [3, 27, 28, 29] en pruebas triaxiales cíclicas a compresión sin confinar, muestran que mientras el esfuerzo máximo aplicado tiene una magnitud inferior al límite elástico,  $\sigma_e$ , es:

- Sin degradación de la tangente inicial del Módulo de Young con cargas cíclicas

Sin embargo, como se muestra en la figura 2.3, los niveles de esfuerzo van más allá del rango elástico, los cuales inducen deformación plástica y degradación del módulo de rigidez. Esto último se observa por el deterioro progresivo de las curvas de carga y descarga. Como se observa en la figura 2.3, el promedio de la tangente del Módulo de Young para cada ciclo de carga y descarga es pequeño respecto a la tangente inicial del Módulo de Young y decrece en magnitud con el incremento de la deformación.

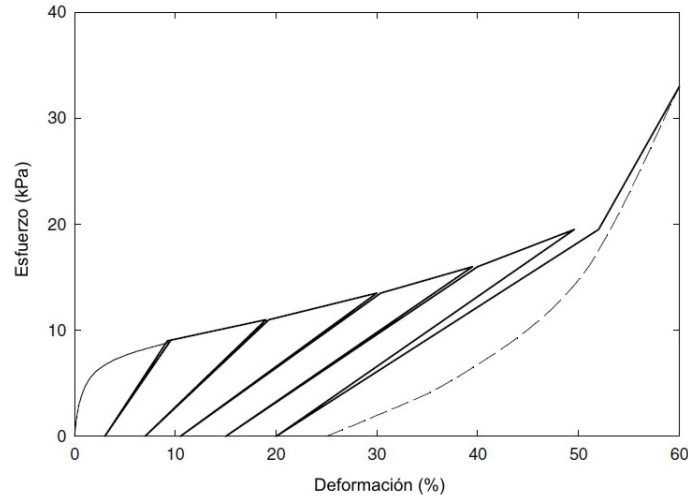


Figura 2.3: Comportamiento cíclico de un bloque de EPS [20]

### 2.3.3. Relación de *Poisson*

Las observaciones y conclusiones concernientes a la relación de *Poisson* están basadas en pruebas con especímenes que se preparan de la misma forma que para cargas cíclicas estáticas. Varias investigaciones [24, 29, 30], han estimado valores o equivalencias para la relación de *Poisson* de los bloques de EPS en pruebas de laboratorio. La relación de *Poisson* para los bloques de EPS es mucho menor que la de los suelos, incluso puede ser insignificante. Sin embargo, la relación de *Poisson* podría ser negativa en el intervalo post-elástico de la curva carga-deformación [2, 25, 27, 31]. En la figura 2.4 se observa una distribución de la relación de *Poisson* para diferentes esfuerzos confinantes.

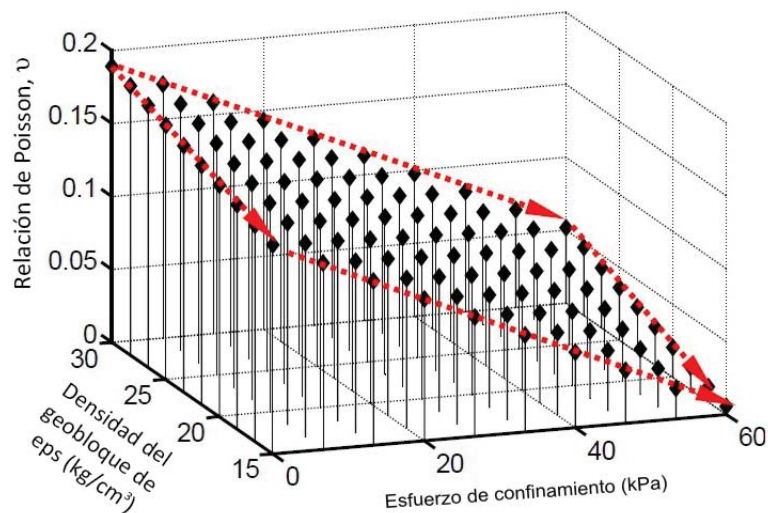


Figura 2.4: Distribución de la relación de *Poisson* en función de las densidades y el esfuerzo de confinamiento [24]

### 2.3.4. *Creep* o fluencia lenta del material

Otra aspecto relevante en el comportamiento mecánico del EPS en su respuesta en el tiempo debido a cargas sostenidas *creep*. En el comportamiento de *creep* influyen cinco variables que afectan la respuesta del EPS, las cuales son: densidad, esfuerzo, deformación, tiempo y temperatura [20].

En general el comportamiento del bloque de EPS esta en función del tiempo y es similar a otros materiales ingenieriles, en la figura 2.5 se muestran resultados de las pruebas de *creep* en donde se utilizaron dos muestras de bloques de EPS con diferentes densidades,  $\rho$ .

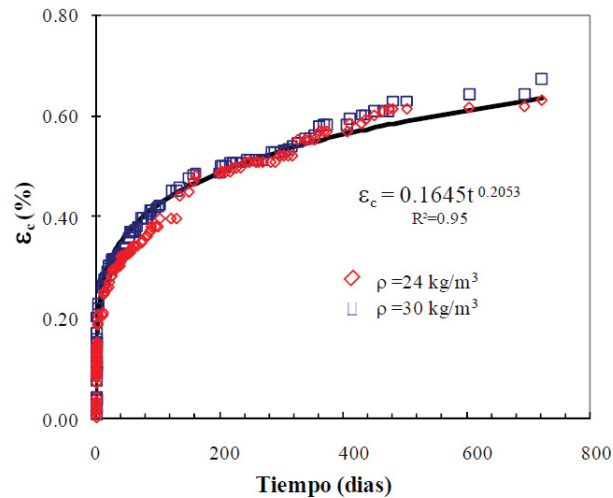


Figura 2.5: Evolución de las deformaciones por *creep* [1]

Algunas investigaciones de *creep* [1, 29, 30, 32] realizadas, muestran una carencia de un método estándar para las pruebas de *creep* en bloques de EPS, ya que el único común denominador es la temperatura, ya que casi siempre se realizan en condiciones ambientales de  $23^\circ\text{C}$  y una humedad promedio de 50 %.



### 2.3.5. Modelos constitutivos de bloques de poliestireno expandido

Una ley constitutiva define la relación que existe entre cantidades físicas como el esfuerzo-deformación-tiempo. Hasta ahora, los modelos constitutivos desarrollados en aplicación de bloques de EPS se clasifican en dos grupos; esto es si se considera el *creep* (depende del tiempo) o si no se considera. Una de ellas es del modelo independiente del tiempo, que es útil para una carga relativamente rápida, por la cual la influencia del *creep* es despreciada; entonces estos modelos se enfocan a una deformación inmediata [3, 24, 25, 33]. Sin embargo, estos modelos constitutivos se basan en un método de ajuste en función de curvas matemáticas, en la figura 2.6, se muestran gráficas esfuerzo por compresión-deformación de muestras de EPS a las cuales se les aplicaron presiones de confinamiento en un rango de 0 a 60 kPa, se presentan además estimaciones del comportamiento a compresión del mismo material obtenidas mediante modelos constitutivos. La aproximación entre la predicción de dichos modelos y los resultados experimentales es significativa.

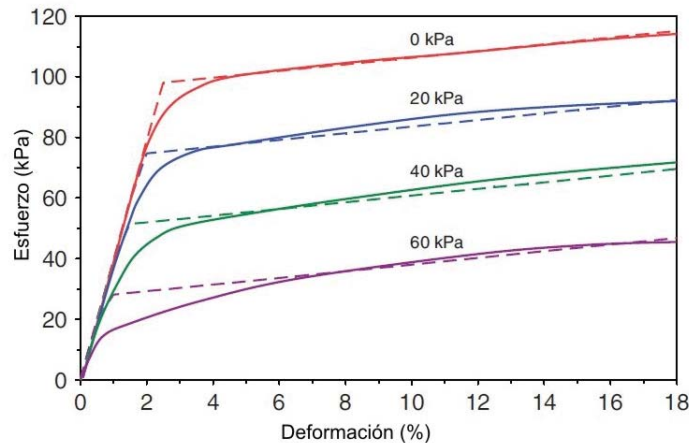


Figura 2.6: Esfuerzo desviador contra deformación axial para varios esfuerzos confinantes. Las curvas experimentales se representan con líneas continuas. Los resultados del modelo se representan con líneas discontinuas [33]

Los modelos que dependen del tiempo pertenecen a un segundo grupo de modelos constitutivos de EPS donde el *creep* se considera un factor importante para este tipo de modelos, también, en un bloque de EPS el *creep* está en función al esfuerzo aplicado y a su densidad. Estos modelos son propuestos para predecir el comportamiento de un esfuerzo vertical o deformación de un bloque de EPS que se produce bajo un esfuerzo, una forma de realizar estas predicciones es utilizando la ley general de potencias y la ecuación de Findley [32]. Horvath [32], describe la aplicación de un modelo de bloque de EPS. Asimismo, han sido realizadas investigaciones utilizando modelos numéricos y experimentales para determinar el comportamiento del *creep* en especímenes cilíndricos de EPS [30, 34]. Esto sólo es una visión general de la teoría y aplicaciones en ambos modelos. En la figura 2.7 se muestra el modelo propuesto que predice un comportamiento esfuerzo-deformación del bloque de EPS bajo un estado de confinamiento nulo, y da como resultado una tendencia muy aproximada.

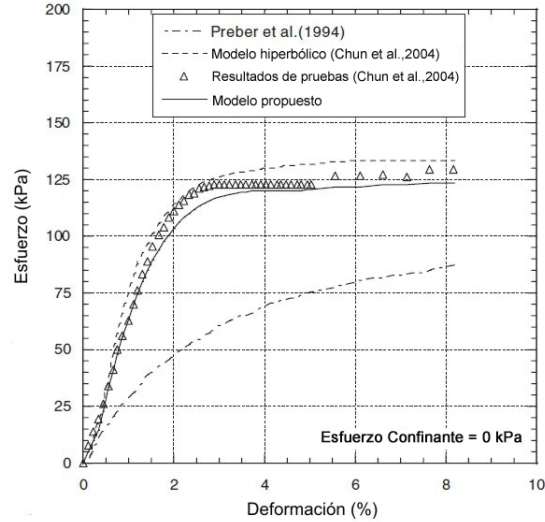


Figura 2.7: Comparación con otros modelos en estado no confinado [34]

### 2.3.6. Reciclado del poliestireno expandido

El aumento en la generación y disposición de desecho tales como : la madera, el vidrio, el fierro y productos de EPS, entre otros, se ha convertido en un problema de salud pública en diferentes países y una forma de mitigar el impacto ambiental que los desechos sólidos producen es realizando el reciclado de estos productos.

En el caso específico del EPS, Kan *et al.* [35] propuso un proceso de modificación que consiste en triturar el EPS para después reducir el volumen a diferentes temperaturas, como se observa en la figura 2.8.



Figura 2.8: Descripción del proceso de modificación de residuos de EPS [35]

Najmaddin *et al.* [36] sometió mezclas de residuos de MEPS [35] en proporciones de 5, 10, 15 y 20 % con respecto al peso de la arena de río bien graduada (SW) a procesos de compactación tipo Proctor estándar. Con este procedimiento se logró reducir significativamente el peso volumétrico compactado de la arena tal como se observa en la figura 2.9.

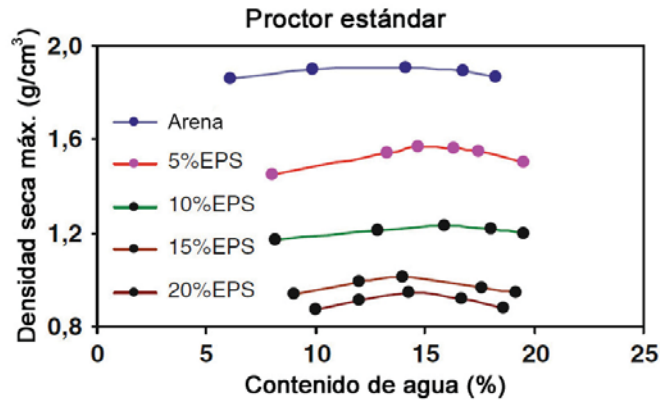


Figura 2.9: Curva de compactación con MEPS [36]

## 2.4. Aplicaciones de bloques de poliestireno expandido

El uso de bloques de EPS en la geotecnia no es nuevo. Este material fue empleado satisfactoriamente por ingenieros geotécnicos de Noruega en los años setenta, a principios de los años ochenta en Alemania se inicia su uso en terraplenes aligerados con bloques moldeados de EPS como material de sub-base [37]. Actualmente, el uso del EPS sigue vigente, siendo el aligeramiento de suelos el uso más frecuente que se le da a este material [27, 37, 38].

Para observar la versatilidad actual del material en conjunto con sus aplicaciones potenciales, Horvath [20, 39, 40, 41] las clasifica de acuerdo a sus funciones y experiencias con aplicaciones actuales a la práctica como se mencionan en 2.4.1, 2.4.2, 2.4.3 y 2.4.4

### 2.4.1. Inclusiones compresibles

En las aplicaciones geotécnicas, una inclusión generalmente es el componente más compresible de la estructura-suelo-inclusión, y se deformará más fácilmente que otros componentes del sistema bajo un esfuerzo aplicado.

Existen tres categorías identificadas y utilizadas de aplicaciones de inclusiones compresibles en problemas geotécnicos:

- Rellenos en la parte posterior de una estructura de retención, esto es para reducir los empujes laterales tal como se observa en la figura 2.10 (a).

- Mejoramiento de suelo debajo de los elementos de cimentación (suelos expansivos), mediante la sustitución parcial de suelo por bloques de EPS. En este caso dicho material funciona un colchón deformable, tal como se observa en la figura 2.10 (b).
- Colocación de bloques de EPS en la parte superior de tuberías, alcantarillas y túneles, con el fin de disminuir esfuerzos sobre dichas estructuras, tal como se observa en la figura 2.10 (c).

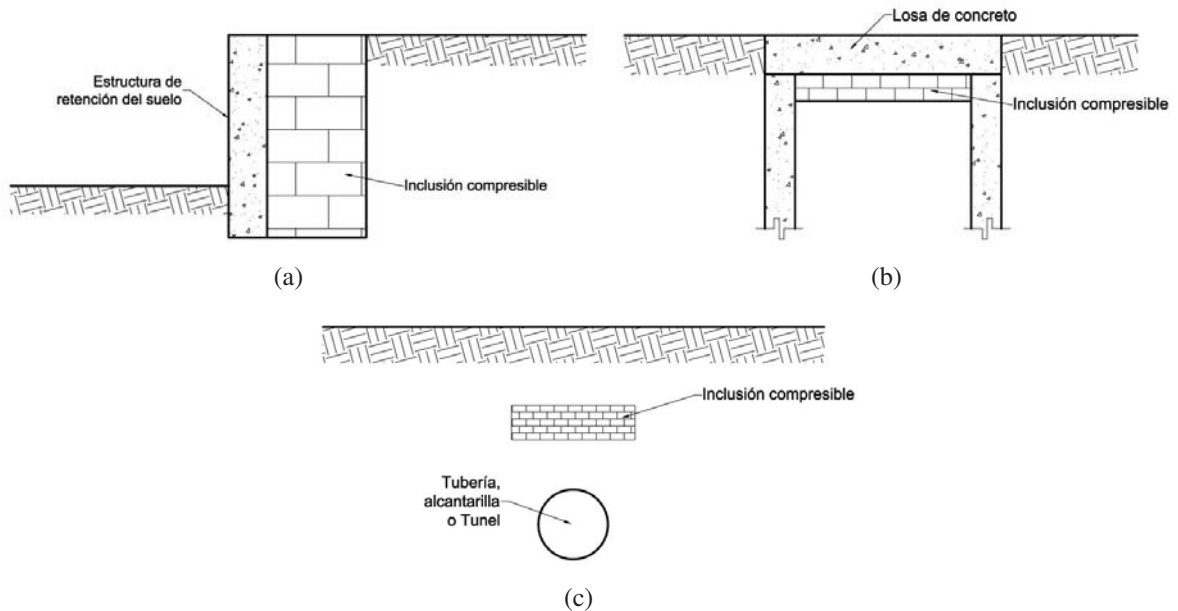


Figura 2.10: Inclusiones compresibles

#### 2.4.2. Disminución de ruido y amortiguamiento de vibraciones

Es importante señalar que las vibraciones que aquí se consideran se limitan a los tipos de amplitud relativamente pequeñas asociadas con los vehículos de motor y trenes, que a su vez, causan problemas de mantenimiento. La disminución del ruido y amortiguamiento de vibraciones es otra función del bloque de EPS que ha sido poco investigada y utilizada, y se remonta por lo menos al año de 1980. Sin duda, esta aplicación representa un uso moderado debido a que aún no existe una evaluación analítica, es por esto que cada aplicación tiene que ser evaluada de forma específica. Sin embargo, los bloques de EPS han demostrado ser útiles al menos en dos aplicaciones como se menciona a continuación:

- Vibraciones transmitidas a través del suelo por los vehículos de motor y de trenes
- Disminución del ruido de los trenes

### 2.4.3. Aislamiento térmico

Los bloques de EPS están conformados por aproximadamente 98 % de aire y 2 % de poliestireno. El aire atrapado dentro del bloque de EPS es un mal conductor del calor, por lo tanto, el bloque de EPS es excelente para el aislamiento térmico.

En climas extremos se espera que el suelo se congele durante el invierno y durante la primavera se descongele, esto afecta de manera importante las vías de transporte como carreteras, aeropuertos, ferrocarriles. Una opción para evitar parte de este fenómeno, consiste en utilizar una capa de EPS como sub-base, esto se debe a que dicho material es impermeable y por lo tanto no permite el ascenso de agua desde las capas inferiores hacia la superficie, como se observa en la figura 2.11.

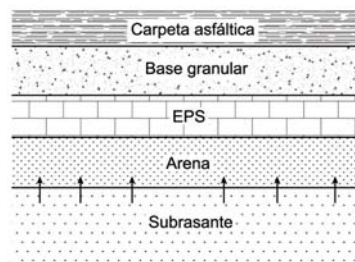


Figura 2.11: EPS como aislante térmico

### 2.4.4. Rellenos ligeros

Los bloques de EPS son materiales únicos que tienen una densidad entre el 1 % y el 2 % de la densidad del suelo y la roca, aun así, la eficiencia de su estructura celular es lo suficientemente fuerte para soportar diversos tipos de cargas, entre las que se encuentran las aplicaciones geotécnicas, especialmente en medios de transporte (por ejemplo, terraplenes de carreteras y ferrocarriles). Así, una de las primeras funciones del bloque de EPS que se desarrolló fue su uso como material de relleno ligero en una amplia variedad de movimientos de tierras. La gran ventaja de usar bloques de EPS a diferencia de otros materiales en movimientos de tierra es que con su uso se reduce el esfuerzo significativamente debajo de la sub-rasante. Esto puede tener múltiples beneficios en términos de reducción de los asentamientos, una mayor estabilidad frente a fallas de taludes, entre otras (ver figs. 2.12 y 2.13).

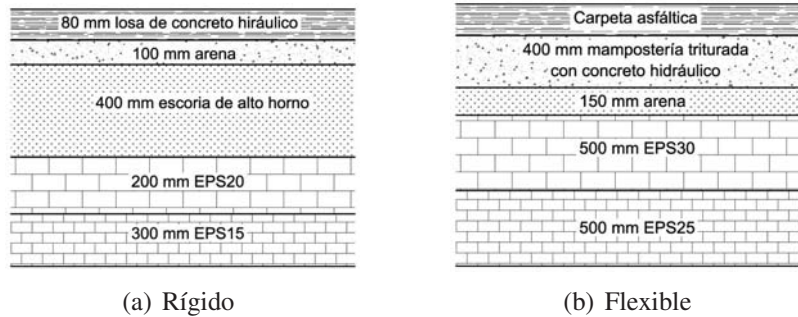


Figura 2.12: Estructuras de pavimento [42]

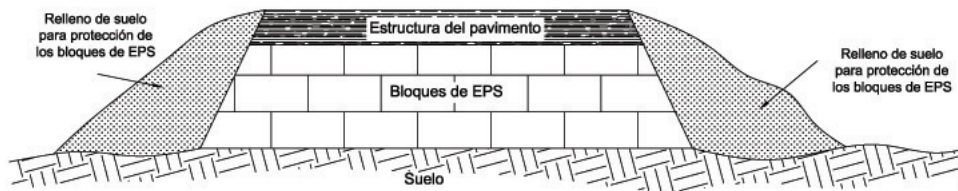


Figura 2.13: Componentes principales de un terraplén aligerado con bloques de EPS

### 2.4.5. Aspectos fundamentales para el diseño con EPS

Aunque los bloques de EPS se han utilizado con éxito en aplicaciones de ingeniería geotécnica, existen aspectos que se deben tomar en cuenta en el diseño como lo son: el fuego, la flotación de bloques y la formación de hielo en el pavimento pueden ser las principales causas de fracaso [41]. Aunque se debe estar consciente de estas situaciones tanto en el diseño como en la construcción de futuras estructuras. Elragi [43], propone algunas consideraciones para el diseño y la construcción que son: flotabilidad, cargas concentradas, ataque químico, inflamabilidad, degradación ultravioleta, diferencial de formación de hielo, infestación de insectos, absorción de humedad, espacios entre los bloques, deformación inmediata, conexiones con elementos estructurales y arquitectónicos, deslizamientos, alineación de bloques, zonas de transición. Tomando en cuenta las consideraciones antes mencionada, se pretende que la futura estructura sea un éxito.

## 2.5. Perlas de poliestireno expandido

El tema del aligeramiento de suelo con perlas de EPS es un tema de investigación reciente por parte de algunos investigadores, es por esto, que las investigaciones son muy reducidas como los que se mencionan a continuación:

Liu *et al.* [44], realizaron pruebas de esfuerzo-deformación no confinadas con diferentes proporciones de perlas de EPS-arena-cemento para reducir su densidad de  $1700\text{-}2100\text{ kg/m}^3$  a  $700\text{-}1100\text{ kg/m}^3$ . Se encontró que las curvas esfuerzo-deformación son afectadas significativamente por el cemento que se agrega al suelo y el agua, pero no por las perlas de EPS (ver fig. 2.14).

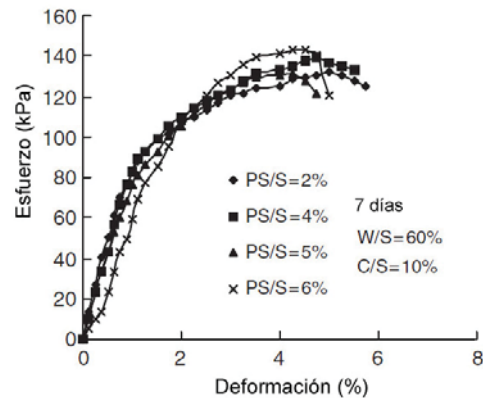


Figura 2.14: Curvas esfuerzo-deformación con contenidos diferentes de EPS (PS/S) [44]

Yoonz *et al.* [45] realizaron pruebas no confinadas y pruebas triaxiales de compresión con mezclas de perlas de EPS (diferentes proporciones)-cemento-arcilla-agua; y encontró que el esfuerzo de compresión es independiente de la presión de confinamiento. Eso significa que el comportamiento esfuerzo-deformación es similar a un suelo-cemento y en pruebas no confinadas la relación es constante para la relación de cemento (ver fig. 2.15).

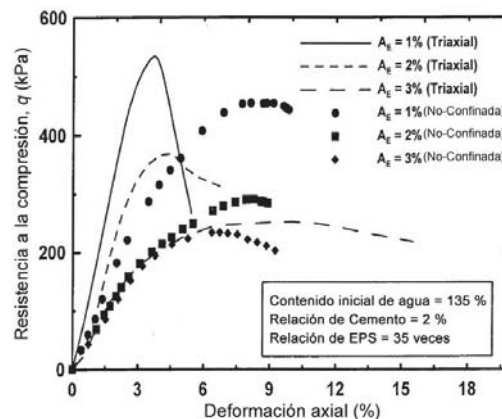


Figura 2.15: Resistencia a la compresión-deformación con contenidos diferentes de EPS ( $A_E$ ) [45]

Gao *et al.* [46] realizaron especímenes formados de arena, cemento Portland, perlas de EPS y diferentes contenidos de agua que fueron ensayados en pruebas tiraxiales cíclicas en condiciones no drenadas. Observaron que para muestras sometidas a menor una menor relación crítica del esfuerzo cíclico,  $s$ , en la etapa de carga inicial,  $\delta$ , disminuye el esfuerzo para después mantenerse constante con el aumento de número de ciclos,  $N$ ; estas curvas se clasifican como suaves, debido a que reflejan las características de reducción del módulo que es relativamente moderado. El otro tipo de curvas es de caída rápida tal como se observa en la figura 2.16.

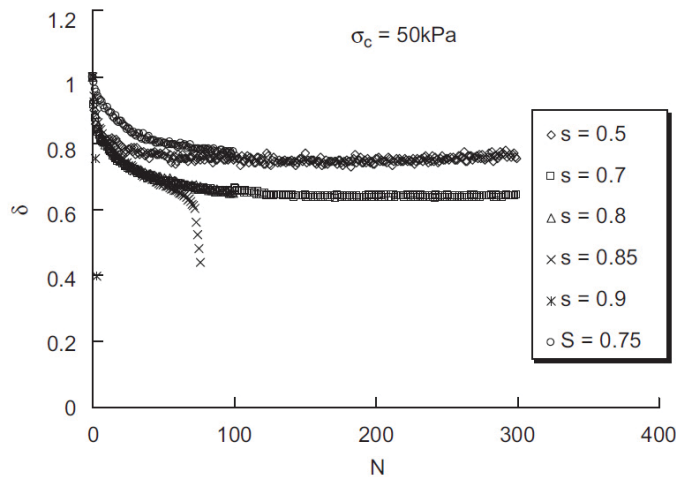


Figura 2.16: Comparación de los módulos de curvas de reducción bajo diferentes relaciones de esfuerzo cíclico [46]

Deng *et al.* [47] realizaron pruebas triaxiales confinadas drenadas (CD) en mezclas de arena-agua-perlas de EPS (en diferentes proporciones), con diferentes presiones de confinamiento, los resultados indican que el contenido de perlas de EPS y la presión de confinamiento influyen en las curvas esfuerzo-deformación y el comportamiento de la deformación volumétrica de las mezclas; con estos resultados obtenidos, utilizó un modelo esfuerzo-deformación para las mezclas arena-perlas de EPS (ver fig.2.17, para una comparación con resultados experimentales).

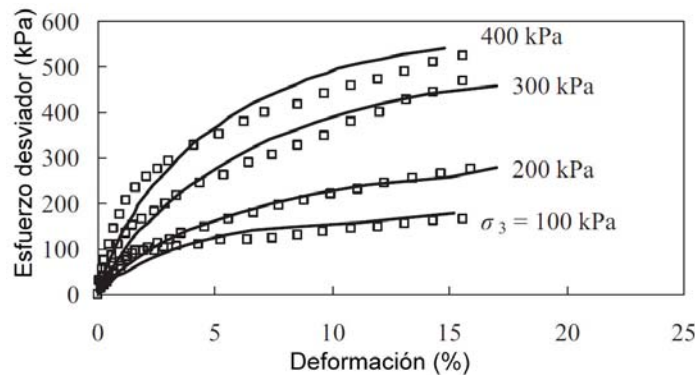


Figura 2.17: Modelo esfuerzo-deformación visto para un contenido de 0.5% de EPS en peso [47]



Romo *et al.* [4] realizaron ensayos no consolidados no-drenados (UU) para dos mezclas de suelo (arena limosa y limo de alta plasticidad) - perlas de EPS (en diferentes proporciones); y se observa cómo influyen las perlas de EPS en la curva esfuerzo-deformación. Para el material que no tiene perlas de EPS, observamos que la falla es frágil y al agregar las perlas de EPS la falla se vuelve dúctil (ver fig. 2.18).

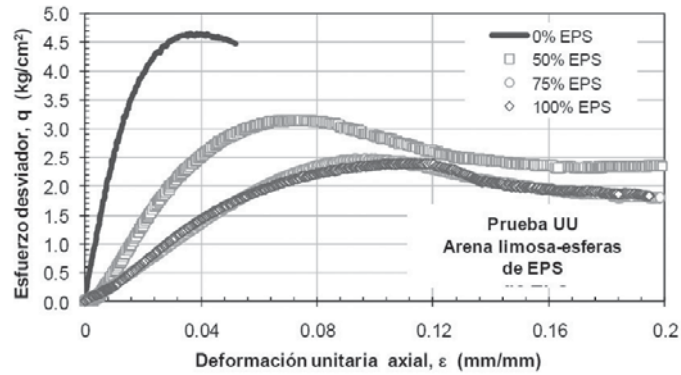


Figura 2.18: Curvas esfuerzo deformación en mezclas de arena limosa-perlas de EPS [4]

## Capítulo 3

# Compactación de la mezcla arena-caolín-perlas de EPS

El objetivo de este capítulo es presentar los materiales con sus propiedades índice o granulométricas, así como la descripción del equipo de compactación que se utiliza para el trabajo experimental realizado en esta tesis. También se presenta una propuesta de compactación modificada para una mezcla de suelo con perlas de EPS.

La importancia de presentar este proceso de compactación modificada es por dos razones que se mencionan a continuación:

- Por una parte, es necesario contar con un proceso estándar para una mezcla suelo-perlas de EPS como base; de esta forma, las pruebas de laboratorio que se realicen sean reproducibles y así tener un enfoque preciso del comportamiento mecánico.
- Y por otro lado, realizar especímenes con 3 energías diferentes las cuales son: 14.57, 18.21 y  $21.86 \frac{kg-cm}{cm^3}$  y observar si son factibles para realizar futuros ensaye para pruebas mecánicas: estáticas y dinámicas.

### 3.1. Aspectos generales

Los resultados de una compactación de suelos no sólo dependen del proceso que se le aplica para compactar el suelo, sino también del proceso de preparación. Además, en algunas ocasiones no se describe el procedimiento de preparación del material por ensayar y las pruebas de laboratorio no siempre se realizan con el esmero requerido.

El procedimiento de compactación por impactos estándar se utilizó en varias investigaciones [4, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18], en donde se toman en cuenta algunos factores que afectan la compactación y algunos efectos que influyen en esta.

En esta investigación, el proceso de compactación por impactos modificado no sólo da un enfoque para determinar un  $\gamma_c$  y un  $w_c$ , ya que el uso del molde cilíndrico es una proporción conveniente de diámetro a la altura. Con estos resultados, es recomendable realizar futuros ensayos a especímenes e integrarlos a futuras pruebas para observar su comportamiento mecánico en pruebas estáticas y dinámicas.

## 3.2. Materiales

### 3.2.1. Arena sílica

Cerca de media docena de minerales que componen principalmente de O, Si, Al, Ca, Mg, Fe, Na y rocas plutónicas. La sílice y los silicatos constituyen más del 95 % de los materiales de la corteza terrestre (parte exterior de la Tierra) hasta una profundidad de 30 km [48].

Los minerales silicatados que comúnmente forman parte de las rocas son las llamadas no-ferromagnesianas, simplemente porque no contienen hierro o magnesio. Estos minerales son la muscovita, los feldespatos y el cuarzo. Se caracterizan por sus colores claros y sus pesos específicos que varían entre 2.6 a 3.0.

#### Propiedades índice de la arena sílica

Las características granulométricas de la arena sílica (ver fig. 3.1) que se utilizó para esta tesis se presentan en la la tabla 3.1.



*Figura 3.1: Arena sílica*

Tabla 3.1: Propiedades granulométricas de la arena sílica

Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	$\omega_L$ (%)	$\omega_P$ (%)	PI (%)	Gs	Clasificación SUCS
0	99.73	0.27	—	—	—	2.62	SP - Arena mal graduada

### 3.2.2. Caolín

El nombre caolín se origina del chino “Kau-ling” y significa “cerro alto”, sitio donde el caolín fue extraído por primera vez y fue el nombre de la montaña de la que por primera vez se embarcó la caolinita a Europa para usos cerámicos [49].

#### Propiedades índice del caolín

Las características de plasticidad del caolín que se utilizaron para esta tesis se presentan en la tabla 3.2.



Figura 3.2: Caolín

Tabla 3.2: Propiedades índice del caolín

$\omega_L$ (%)	$\omega_P$ (%)	PI (%)	Gs	Clasificación SUCS
34.2	26.15	8.05	2.5	CL - Arcilla de baja plasticidad

### 3.2.3. Perlas de poliestireno expandido

Las perlas de EPS que se utilizaron corresponden a la denominación EPS No. 22 BF327, estas perlas oscilan de un diámetro de 2 mm a 3 mm, como se observa en la figura 3.3.



Figura 3.3: Perlas de EPS

## 3.3. Equipo de compactación

### 3.3.1. Molde y pisón

De acuerdo con una proporción conveniente de diámetro a la altura, es factible, ensayar el espécimen integral, resultante de la compactación, en alguna prueba que defina su comportamiento esfuerzo-deformación, con lo que se evita el labrado del espécimen. El diseño del molde bipartido original consta de un diámetro interior de 3.6 cm con una altura de 8.5 cm; Alberro *et al.* [14] lo denominaron molde I de I UNAM [14].

Para esta tesis, se empleó un molde cilíndrico bipartido longitudinalmente, que consta de un diámetro interior de 3.6 cm y una altura de 9 cm. Además, tiene una extensión de un diámetro interior de 3.6 cm y con una altura de 3.7 cm y tiene una base donde se coloca el molde cilíndrico bipartido como se muestra en la figura 3.4.

El molde es propio para densificar suelos en el laboratorio en una compactación por impactos. A este molde lo denominé: molde I de I modificado. Debido a sus dimensiones, el tamaño máximo de las partículas del material se limita. Es por esto, que se debe emplear un material que pase por la malla No. 4 (4.76 mm), y así obtenemos un valor de 7.5 para el cociente entre el diámetro del molde y el tamaño máximo de granos.



(a) Vista del molde



(b) Vista del molde desarmado

*Figura 3.4: Molde I de I modificado*

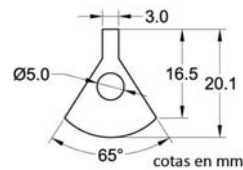
El molde y pisón que se observan en la figura 3.5 (a) y (b), que se emplearon en el experimento para esta tesis, es idea del Dr. M. Mendoza [50], precursor de los pisones con zapatas de sectores [19]. El pisón tiene una altura de caída de 25 cm, la zapata tiene una geometría semi circular y una abertura de  $65^\circ$ , como se observa en la figura 3.5 (c), es originada para distribuir mejor la energía de compactación en todo el volumen del molde de compactación. Así, al realizar la compactación, el área de la zapata que ocupa un sector de área no se traslapa con otro sector, entonces se logra distribuir mejor la energía de compactación.



(a) Vista del pisón



(b) Vista del pisón desarmado



(c) Zapata

Figura 3.5: Vista del pisón

### 3.4. Compactación por impactos en el laboratorio

Antes de proponer nuevas etapas al procedimiento de compactación por impactos se realizaron y se analizaron varias posibilidades, hasta encontrar resultados satisfactorios y precisos. El reto es modificar el procedimiento de compactación por impactos para una mezcla de suelo, en donde además se pueda realizar una comparación para las mezclas de suelo que sí utilizan perlas de EPS.

El primer procedimiento se denominó: *Procedimiento de pruebas de compactación por impactos sin perlas de EPS*. Este procedimiento únicamente debe ser utilizado para una mezcla de suelo, es decir, y como su nombre lo indica, no se deben utilizar perlas de EPS, ya que los resultados definitivamente no serán satisfactorios.

El segundo procedimiento se denominó: *Procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS*. Este procedimiento únicamente debe ser utilizado para una mezcla de suelo con perlas de EPS; es decir, como su nombre lo indica no se debe utilizar sólo la mezcla de suelo; ya que los resultados definitivamente no serán satisfactorios.

Ambos procesos son independientes y sus respectivas etapas son dependientes entre ellas. La propuesta de realizar ambos procesos, se llevó a cabo con el propósito de comparar resultados respecto al uso y desuso de las perlas de EPS.

Los procedimientos de compactación por impactos sin y con perlas de EPS se describen detalladamente en 3.4.1 y 3.4.2, respectivamente.

Antes de iniciar con los procedimientos se verifica que el molde, la extensión, la base y los aparatos se encuentren secos y limpios. Enseguida, se pesa el cuerpo del molde con 1 g de exactitud. Después, se mide con un Vernier el diámetro interno ( $D$ ) y la altura ( $L$ ) en diferentes lados, con una exactitud de 0.1 mm, y se calcula la dimensión media. Finalmente, se calcula el volumen interno del molde ( $V$ ) con la siguiente ecuación:

$$V = \pi * r^2 * h \quad (3.1)$$

Donde:

$V$  = volumen del molde en ( $\text{cm}^3$ )

$r$  = radio interior del molde (cm)

$h$  = altura interior del molde (cm)

### 3.4.1. Procedimiento de pruebas de compactación por impactos sin perlas de poliestireno expandido

#### Descripción de cada etapa

Etapa 1. **Preparar material:** Se coloca en una charola 200 g de arena, se agrega el 20 % más de caolín; es decir, 40 g y se homogeniza el material. Enseguida, se agrega agua para los diversos contenidos de agua, inmediatamente después se mezcla minuciosamente el agua y el suelo. Después se coloca el material en una bolsa y se cierra; finalmente, se coloca la bolsa con el material en el cuarto húmedo por 24 horas. En la figura 3.6, se muestran imágenes de la preparación del material.





Figura 3.6: Proceso para preparar el material, previo a la compactación

**Etapas 2. Colocar el suelo en el molde:** Se coloca el molde ensamblado sobre una base sólida y horizontal, ya que una base flexible resulta inadecuada para la compactación.

Enseguida se pesa el material requerido por capa, obtenido previamente para cada uno de los puntos de la curva de compactación y se agrega el suelo suelto al molde. Finalmente, se compacta el suelo y se aplica el número de golpes requerido.

**Etapas 3. Compactar el suelo en el molde:** Verificar que la guía del pisón y el pisón estén verticalmente, la ranura vertical de la guía y la sección circular del pisón debe estar en la orilla de la pared del molde, para asegurar la repetitividad de las pruebas. Asegurar que la mano que sostiene la guía deberá estar alejada del pisón al caer.

Debido a que el material está suelto, la secuencia de los primeros ocho golpes al inicio de cada capa se deben aplicar de una manera sistemática para asegurar la mayor eficiencia en la compactación y una máxima reproducibilidad en los resultados, siguiendo la secuencia de la figura 3.7 (a) y (b). Después de esto, el pisón se rota en sentido horario alrededor de la pared interna del molde consecutivamente entre cada golpe, como se muestra en la figura 3.7 (c). Se verifica que cada vez que el pisón suba, el suelo no impida la caída libre de éste. Se asegura que el extremo inferior de la guía del pisón descansa en la superficie del suelo suavemente antes de soltar el pisón. Al término de cada capa compactada se deberá escarificar y girar el molde 90° como se muestra en la figura 3.8. Para esta investigación se realizaron especímenes con ocho capas y con 24, 32 y 42 impactos.

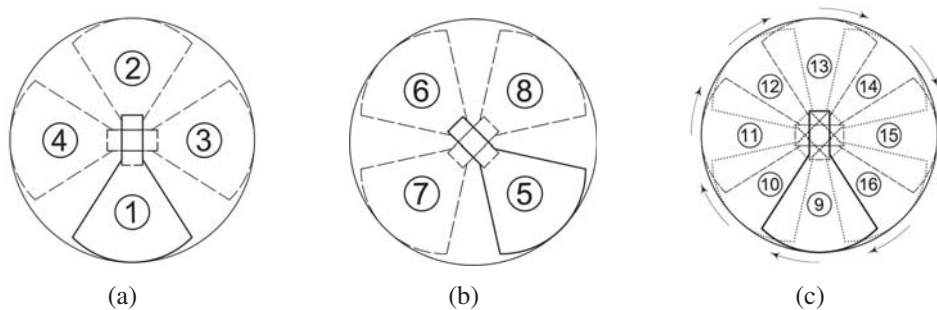


Figura 3.7: Secuencia de impactos

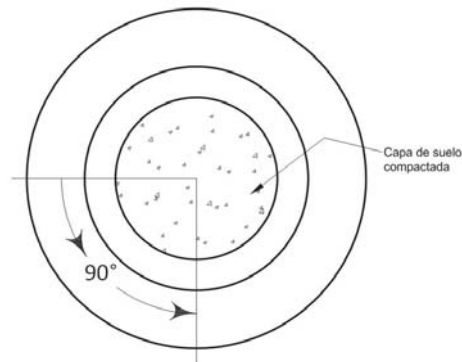


Figura 3.8: Secuencia del molde

- Etapa 4. **Quitar excesos:** Al retirar la extensión cuidadosamente se quitan los excesos del suelo con ayuda de una espátula tipo cuchillo del centro del molde hacia afuera, hasta que el borde esté plano. En caso de existir cavidades, se rellenan cuidadosamente con el mismo material.
- Etapa 5. **Pesar la probeta:** Sin retirar el molde ni la base, se pesan en la balanza con una sensibilidad de 0.1 g.
- Etapa 6. **Obtener el contenido de agua de la probeta:** Se retira la base del molde y se separa el molde para tomar dos muestras representativas de la parte media de la muestra de aproximadamente 40 g de suelo cada una; inmediatamente se pesa en la balanza con una sensibilidad de 0.01 g. Después se colocan las cápsulas en el horno de convección durante 24 horas a una temperatura de 105 a 110°C. Finalmente, se sacan las muestras del horno y se colocan dentro del desecador al menos 3 horas y se pesan en una balanza con una sensibilidad de 0.01 g.
- Etapa 7. **Repetir etapas:** Se repiten las etapas 1 a 6 para determinar cada punto de la curva, hasta obtener los puntos que son representativos para la curva de compactación del suelo.
- Etapa 8. **Calcular:**
- a) El peso volumétrico húmedo,  $\gamma_m$  (peso del suelo húmedo por unidad de volumen de la masa del suelo) se realiza con la siguiente ecuación:

$$\gamma_m = \frac{W}{V} \quad (3.2)$$

Donde:

W = Peso total del material en el molde (g)

V = Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)



- b) El peso volumétrico seco,  $\gamma_d$  (peso del suelo seco por unidad de volumen de la masa del suelo) se realiza con la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{W}{V(1 + \frac{w}{100})} \quad (3.3)$$

Donde:

W = Peso total del material en el molde (g)

V = Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)

w = Contenido de agua (%)

### 3.4.2. Procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de poliestireno expandido

#### Descripción de cada etapa

Etapa 1. **Preparar material:** Se coloca en una charola 185 g de arena se agrega 20 % más de caolín (es decir, 37 g.) y se homogeniza el material. Enseguida, se agrega el suelo seco en el vaso de precipitado para medir el volumen de suelo y se pesa, después se coloca el suelo en la charola.

Para una muestra de suelo seco (arena y caolín) con un peso de 222 g se determina el volumen y/o peso de EPS que corresponde a la mezcla de suelo-perlas de EPS, como se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Proporciones en volumen o peso de perlas de EPS para la mezcla (arena-caolín) con un peso de 222 g.

% de perlas de EPS para agregar a la mezcla	25	50	75	100
Peso de perlas de EPS (g)	0.69	1.35	2.04	2.83
Volumen de perlas de EPS (cm <sup>3</sup> )	32.5	65	97.5	130

Para medir el suelo en volumen, se deba tener una cantidad mínima de vacíos, esto se logra al golpear ligeramente el vaso de precipitado para que el suelo se acomode hasta que se observe que no se disminuye el volumen de suelo.

Finalmente, se agrega agua para obtener los diversos contenidos de agua, inmediatamente se mezcla minuciosamente el agua y el suelo, se colocan las perlas dentro de la charola que tiene el suelo, inmediatamente se homogeniza el suelo y las perlas de EPS. Después, se coloca el material en una bolsa y se cierra. Finalmente, se coloca la bolsa con el material en el cuarto húmedo por 24 horas. En la figura 3.9, se muestran imágenes para preparar el material.



Figura 3.9: Proceso para preparar la mezcla suelo-perlas de EPS previo a la compactación

- Etapa 2. **Colocar el suelo en el molde:** Se repite la etapa del procedimiento de pruebas sin EPS. Enseguida se pesa el material requerido por capa obtenido previamente para cada uno de los puntos de la curva de compactación y se agrega la mezcla suelo-EPS suelto al molde.
- Etapa 3. **Homogenizar la mezcla de suelo con la espátula tipo cuchillo:** Se introduce la espátula verticalmente dentro del molde hasta la parte inferior de la base y se rota ocho veces sobre su propio eje al momento que se traslada por la pared interna del molde, y se realiza el homogenizado una vez más. Enseguida, se compacta el suelo y se aplica el número de golpes requerido. Para las capas subsecuentes se agrega el material y se repite el proceso de homogenizar con espátula sin alterar la capa compactada previamente.
- Etapa 4. **Compactar el suelo en el molde:** Se repite la etapa del procedimiento de pruebas sin EPS.
- Etapa 5. **Quitar excesos:** Se repite la etapa del procedimiento de pruebas sin EPS.
- Etapa 6. **Pesar la probeta:** Se repite el paso del procedimiento de pruebas sin EPS.
- Etapa 7. **Obtener el contenido de agua de la probeta:** Se retira la base del molde y el molde para tomar dos muestras representativas de la parte media del espécimen de aproximadamente 40 g de suelo cada una; inmediatamente se disgrega el material (suelo-perlas de EPS) y se pesa en la balanza, con una sensibilidad de 0.01 g. Enseguida, se colocan las cápsulas en un área de secado a la intemperie y se dejan al menos dos semanas. *Separar las perlas de la mezcla de suelo:* Se criba el material con en la malla No. 4; después se colocan las perlas y la mezcla de suelo en cápsulas diferentes. Enseguida, se coloca la cápsula de la mezcla de suelo en el horno de convección durante 24 horas



a una temperatura en el intervalo de 105 a 110°C. Se sacan las muestras del horno y se colocan dentro del desecador al menos 3 horas. Finalmente, se colocan las perlas en la cápsula de la mezcla del suelo y se pesan en una balanza con una sensibilidad de 0.01 g.

No se recomienda colocar la mezcla de suelo-perlas de EPS en el horno de convección, debido a que las perlas de EPS se incineran.

Etapa 8. **Repetir etapas:** Se repiten las etapas 1 a 6 para determinar cada punto de la curva, hasta obtener los puntos que son representativos para la curva de compactación del suelo.

Etapa 9. **Calcular:** Se repite la etapa 8 del procedimiento de las pruebas sin EPS.

### 3.5. Resultados ilustrados de los procesos de compactación

Para observar los resultados del *procedimiento de pruebas de compactación sin perlas de EPS* y el *procedimiento de pruebas de compactación con perlas de EPS* se realizaron especímenes en diversos contenidos de agua, en donde se utilizó una mezcla de suelo (arena y caolín) y perlas de EPS con las siguientes proporciones: 0, 25, 50, 75 y 100 % en volumen. Estos especímenes fueron realizado con contenidos de agua entre 5 % y 12 % con 3 energías de compactación: 14.57, 18.21 y 21.86  $\frac{kg-cm}{cm^3}$  de acuerdo a lo observado en el laboratorio; es decir se realizaron los especímenes más críticos, es decir con una energía de 14.57  $\frac{kg-cm}{cm^3}$ , contenidos de agua en un rango de 5 y 7 % y con un porcentaje de 100 % de volumen de perlas de EPS.

Además, en esta sección se exponen las fotografías de los especímenes en las que se ilustran los resultados de cada uno de los procedimientos. Los procedimientos en el laboratorio se realizaron a una temperatura promedio de 22°C y una humedad promedio de 72 %.

### 3.5.1. Espécimen con una mezcla de suelo con 0 % EPS

El espécimen resultado del *procedimiento de pruebas de compactación por impactos sin perlas de EPS* se observa en la figura 3.10. El espécimen se compacto con una energía de compactación de  $14.57 \frac{kg-cm}{cm^3}$ , los especímenes presentan una pérdida de agua mínima en diversos contenidos de agua y no se observa ningún tipo de grietas o fisuras. Los especímenes son adecuados para ser ensayados en futuras pruebas mecánicas, estáticas o dinámicas.



Figura 3.10: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 0 % de perlas de EPS, en volumen

### 3.5.2. Especímenes con una mezcla de suelo con 25 % EPS

El espécimen resultado del *procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS* se observan en las figuras 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14. Los especímenes en un rango de 5 al 7 % de agua presentan condiciones deficientes. Además, se observa que los especímenes presentan grietas o fisuras y el homogenizado del material es deficiente ya que los especímenes presentan concentración de perlas de EPS.

Los especímenes presentan una pérdida de agua mínima en un rango de 7 al 9 % de contenido de agua. Además, tampoco se observa ningún tipo de grietas o fisuras y el homogenizado del material es de regular a excelente, debido a que a mayor contenido de agua la mezcla se homogeniza mejor en el interior y en la periferia de los especímenes. Los especímenes en un rango de 7 al 9 % de contenido de agua son adecuados para ser ensayados en futuras pruebas mecánicas, estáticas o dinámicas. Sin embargo, para una energía de compactación de  $14.57 \frac{\text{kg-cm}}{\text{cm}^3}$  se observa que los especímenes presentan grietas o fisuras, por lo cual, no son adecuados para realizar pruebas mecánicas.

Los especímenes presentan una pérdida de agua mínima en un rango de 9 al 11 % de contenido de agua. Además, tampoco se observa ningún tipo de grieta o fisura y el homogenizado del material es adecuado, debido a que a mayor contenido de agua la mezcla se homogeniza mejor en el interior y en la periferia de los especímenes. Los especímenes en un rango de 9 al 11 % de contenido de agua son adecuados para ser ensayados en futuras pruebas mecánicas, estáticas o dinámicas.

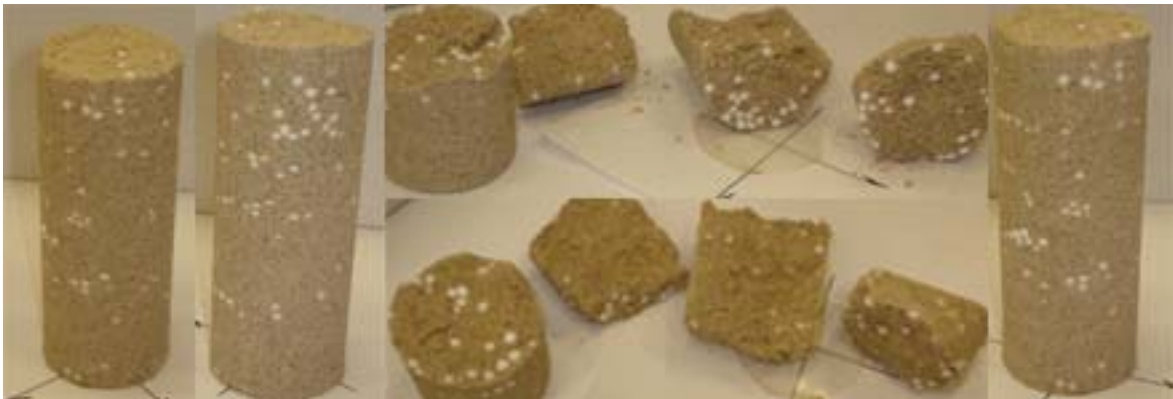


Figura 3.11: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 25 % de perlas de EPS en volumen y un contenido de agua de 5 %

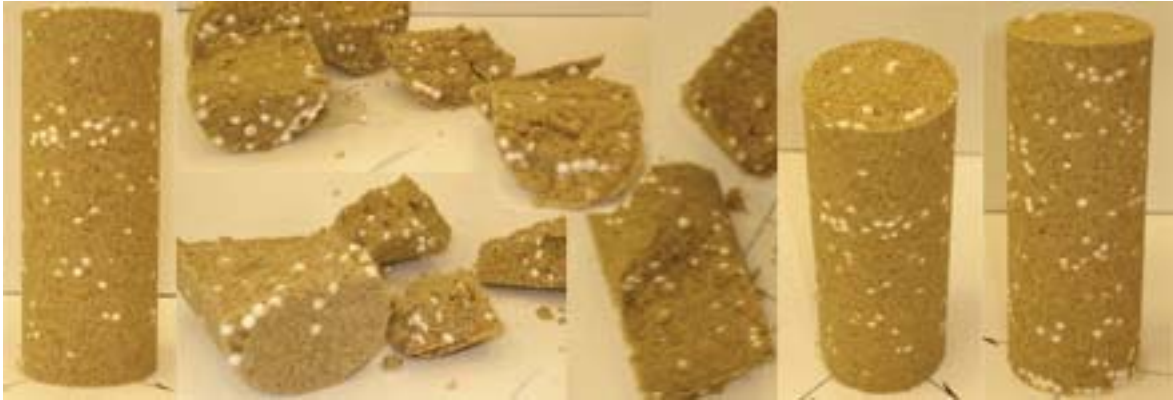


Figura 3.12: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 25 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 7 %



Figura 3.13: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 25 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 9 %

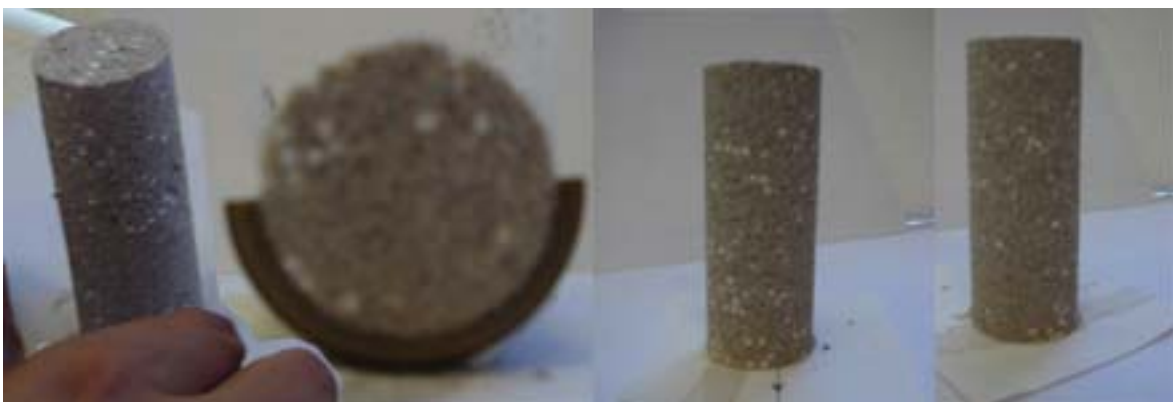


Figura 3.14: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 25 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 11 %



### 3.5.3. Espécimen con una mezcla de suelo con 50 % EPS

El espécimen resultado del *procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS* se muestra en la figura 3.15. El espécimen presenta una pérdida de agua mínima en un rango de 7 al 11 % en diversos contenidos de agua. Tampoco se observa ningún tipo de grietas o fisuras y el homogenizado del material es adecuado debido a que en el interior y en la periferia del espécimen, no presenta ningún tipo de concentración de las perlas de EPS. El espécimen es adecuado para ser ensayado en futuras pruebas mecánicas, estáticas o dinámicas. El espécimen se compactó con una energía de compactación de  $14.57 \frac{\text{kg-cm}}{\text{cm}^3}$ .

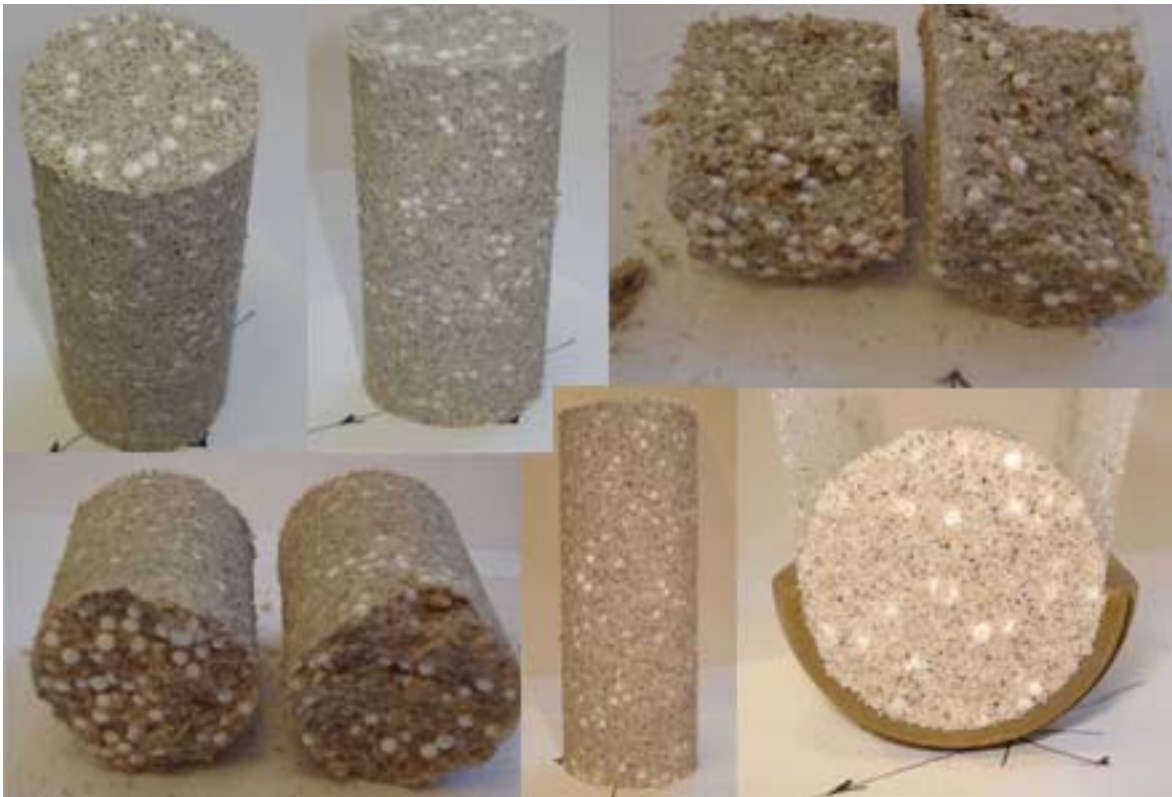


Figura 3.15: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 50 % de perlas de EPS ,en volumen y un contenido de agua de 11 %

### 3.5.4. Espécimen con una mezcla de suelo con 75 % EPS

El espécimen resultado del *procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS* se muestra en la figura 3.16. El espécimen presenta una pérdida de agua mínima en un rango de 7 al 11 % en diversos contenidos de agua. No se observa ningún tipo de grietas o fisuras y el homogenizado del material es adecuado debido a que en el interior y en la periferia del espécimen, no presenta ningún tipo de concentración de las perlas de EPS. El espécimen es adecuado para ser ensayado en futuras pruebas mecánicas, estáticas o dinámicas. El espécimen se compactó con una energía de compactación de  $14.57 \frac{\text{kg-cm}}{\text{cm}^3}$ .



Figura 3.16: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 75 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 11 %

### 3.5.5. Especímenes con una mezcla de suelo con 100 % EPS

El resultado del *procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS* es un espécimen que se observa en la figura 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20. Los especímenes en un rango de 5 al 7 % de agua presentan condiciones deficientes. Además, los especímenes presentan grietas o fisuras y el homogenizado del material es deficiente ya que presenta concentración de perlas de EPS. Los especímenes se compactaron con una energía de compactación de  $21.86 \frac{kg-cm}{cm^3}$ .

Sin embargo, muestran condiciones adecuadas en un rango de 9 al 11 % de contenido de agua. Además, en este intervalo no presentan grietas o fisuras y el homogenizado del material es aceptable, debido a que a mayor contenido de agua la mezcla se homogeniza mejor en el interior y en el exterior de los especímenes. Los especímenes en un rango de 9 al 11 % de contenido de agua son adecuados para ser ensayados en futuras pruebas mecánicas, estáticas o dinámicas. El espécimen se compactó con una energía de compactación de  $14.57 \frac{kg-cm}{cm^3}$ .

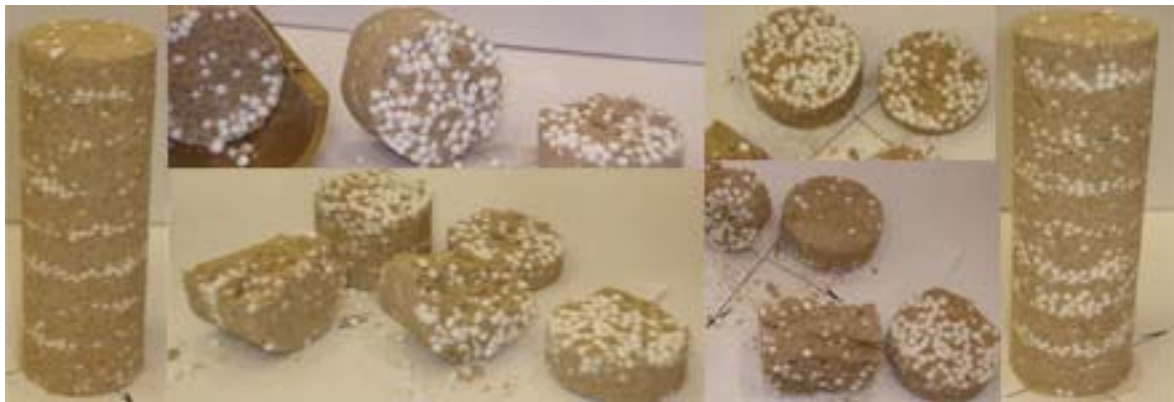


Figura 3.17: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 100 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 5 %

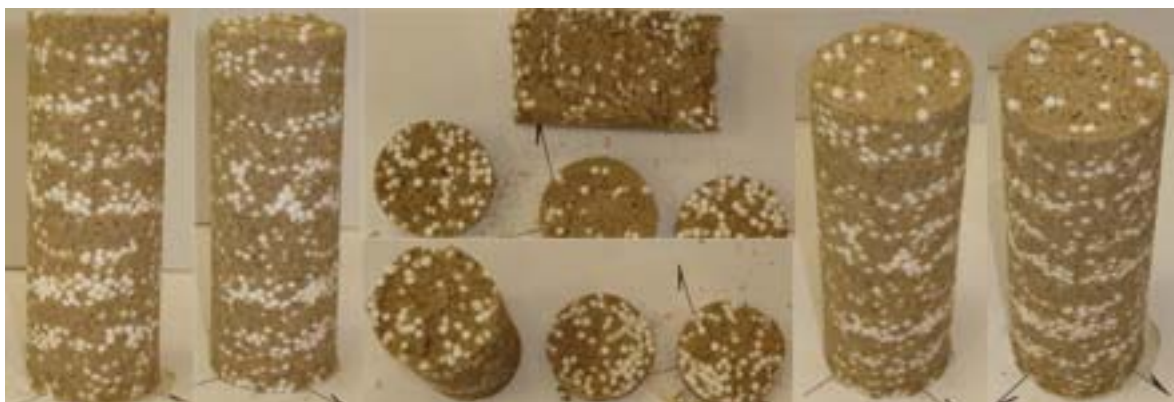


Figura 3.18: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 100 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 7 %

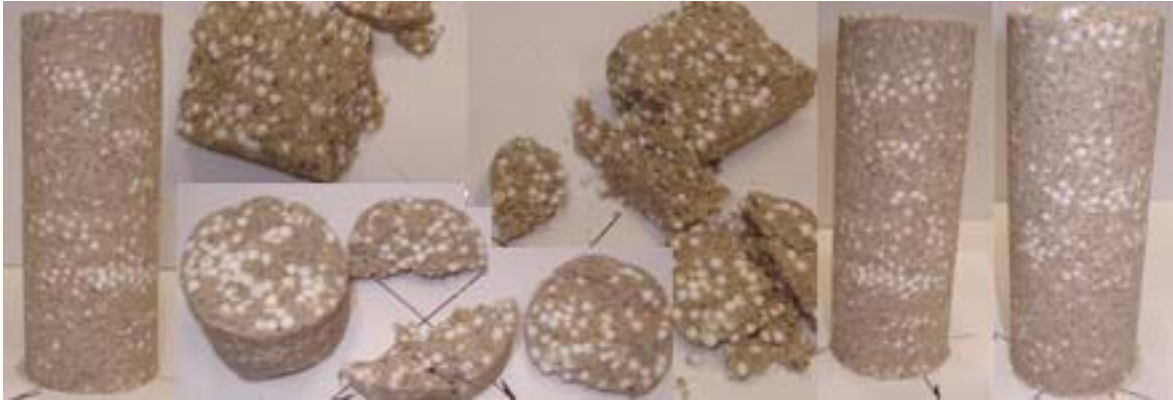


Figura 3.19: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 100 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 9 %

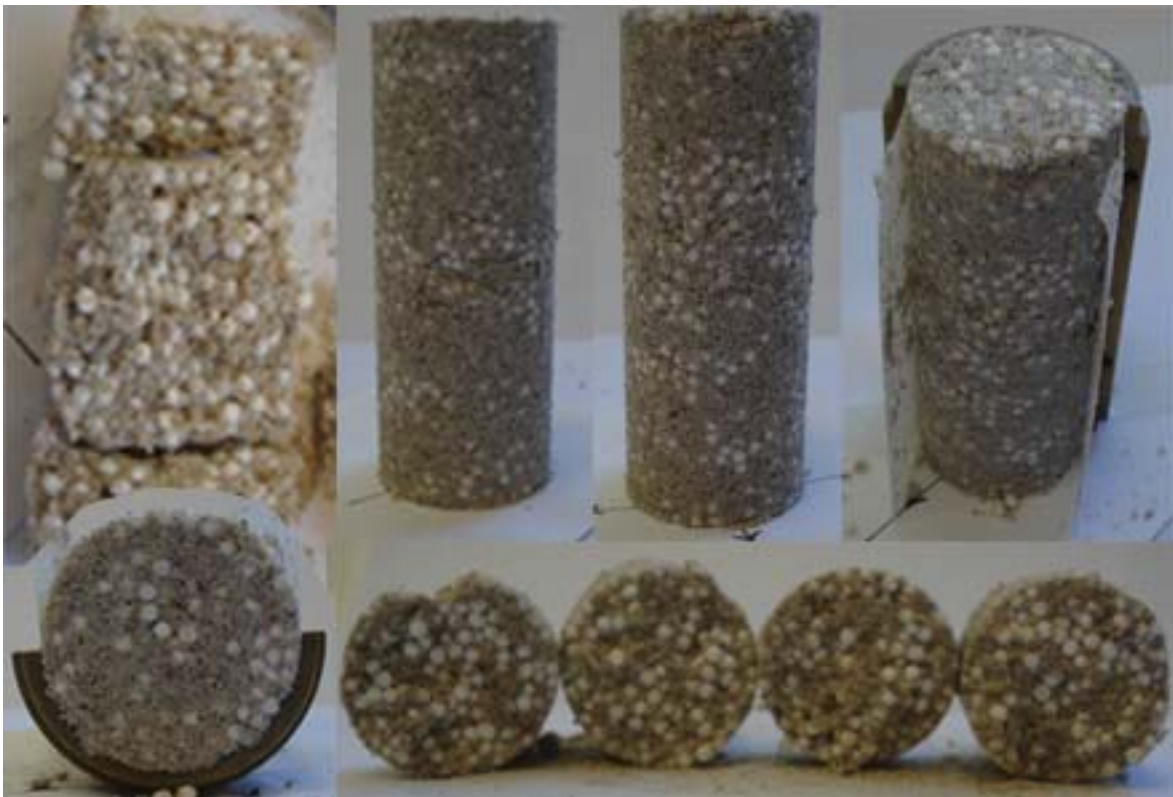


Figura 3.20: Vista del espécimen de una mezcla de suelo con 100 % de perlas de EPS, en volumen y un contenido de agua de 11 %

### 3.5.6. Análisis y discusión de los resultados

A continuación se presenta el análisis y la discusión de los resultados obtenidos de cada uno de los procesos de compactación en el laboratorio

De acuerdo con los resultados obtenidos del *procedimiento de pruebas de compactación por impactos sin perlas de EPS* en el laboratorio se puede afirmar que es satisfactorio, porque no presenta una pérdida significativa de agua y los especímenes no presenta ningún tipo de grietas o fisuras. Además son factible para realizar futuros ensayos mecánicos.

Para el *procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS* en el laboratorio, un etapa importante es el homogenizado de la mezcla para que el espécimen resultante no presente concentraciones de perlas de EPS.

Los resultados se clasifican mediante una manera visual de acuerdo con la concentración de las perlas de EPS, las cuales se dividen en 3 zonas que se mencionan a continuación:

**Zona deficiente:** Esta zona presenta un contenido de agua mínimo, es decir, en un rango del 5 al 7 %. Al realizar el homogenizado del material existe una gran concentración de perlas de EPS, por lo cual el homogenizado no es adecuado. En caso de realizar el proceso de compactación, el resultado es un espécimen que presenta una gran concentración de perlas de EPS, además presenta agrietamientos. Debido a esto no es recomendable realizar pruebas mecánicas en la zona deficiente.

**Zona intermedia:** La zona intermedia presenta un contenido de agua en un rango de 7 al 9 %. Al realizar la compactación y obtener el espécimen se observa que el homogenizado es bueno; sin embargo, para una energía de  $14.57 \frac{kg-cm}{cm^3}$  el material presenta agrietamientos, por lo cual no es recomendable ni posible realizar ensayos mecánicos bajo estas condiciones. Para las energías de  $18.21 \frac{kg-cm}{cm^3}$  y  $21.86 \frac{kg-cm}{cm^3}$  el homogenizado adecuado y no presenta concentraciones de perlas de EPS ni agrietamientos, por lo cual es posible realizar ensayos mecánicos ubicados en esta zona.

**Zona eficiente:** La zona muestra un contenido de agua en un rango de 9 al 11 %. Al realizar la compactación y obtener el espécimen se observa que el homogenizado es bueno y no presenta concentraciones de perlas de EPS ni agrietamientos y en todos los casos es factible realizar ensayos mecánicos.

En resumen y de acuerdo con los resultados obtenidos de los procesos denominados: *procedimiento de pruebas de compactación por impactos sin perlas de EPS* y *procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS*, se ha propuesto una tabla resumen en los que se muestran los resultados de las zonas intermedia y eficiente para las energías de 18.21 y 21.86  $\frac{kg-cm}{cm^3}$ . Esta tabla 3.4 contiene consideraciones que tomo en cuenta para decidir si el espécimen resultante es satisfactorio; estas consideraciones son de distinta naturaleza y se mencionan a continuación:

- La pérdida de agua durante el proceso de compactación por impactos
- La concentración de perlas de EPS
- Observar grietas o fisuras

- La factibilidad de realizar algún tipo de ensaye mecánico.

Tabla 3.4: Resumen general de los procedimientos de compactación por impactos sin y con EPS para las energías de compactación de: 18.21 y 21.86  $\frac{kg-cm}{cm^3}$

<i>Procedimiento de pruebas de compactación por impactos sin perlas de EPS</i>				
<b>Contenido de EPS en volumen (%)</b>	<b>Pérdida de agua</b>	<b>Concentración de perlas de EPS</b>	<b>Tipo de grieta</b>	<b>Es factible realizar ensayos mecánicos</b>
0	Mínima	No aplica	No presenta	Sí es factible
<i>Procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS</i>				
<b>Contenido de EPS en volumen (%)</b>	<b>Pérdida de agua</b>	<b>Concentración de perlas de EPS</b>	<b>Tipo de grieta</b>	<b>Es factible realizar ensayos mecánicos</b>
25	Mínima	No presenta	No presenta	Sí es factible
50	Mínima	No presenta	No presenta	Sí es factible
75	Mínima	No presenta	No presenta	Sí es factible
100	Mínima	Poca concentración	No presenta	Sí es factible

En general, los resultados del *procedimiento de compactación por impactos* son satisfactorios para las energías de 18.21 y 21.86  $\frac{kg-cm}{cm^3}$ , debido a que los especímenes presentan una pérdida de agua mínima, no presentan ningún tipo de grietas o fisuras y son factibles para realizar ensayos mecánicos; sin embargo para el *procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS* al utilizar una energía de 14.57  $\frac{kg-cm}{cm^3}$  y un contenido de agua en la zona intermedia, el espécimen presenta agrietamientos. En caso de agregar un volumen mayor de 100 % de perlas de EPS respecto al volumen de suelo, se debe tomar en cuenta que se disminuye la interacción entre la mezcla de suelo y las perlas de EPS, entonces el espécimen puede presentar una baja o nula fricción o cohesión, debido a esto, es probable que la nueva mezcla de suelo-perlas de EPS presente una falla más rápida en una prueba mecánica.

# Capítulo 4

## Resultados de la compactación por impactos

El objetivo del presente capítulo es presentar el análisis y la discusión de los resultados obtenidos en dos procesos denominados: *procedimiento de pruebas de compactación por impactos sin perlas de EPS* y *procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS*. El primer procedimiento tienen como variables: la energía específica de compactación y el contenido de agua, y el segundo: la energía específica de compactación, el contenido de agua y el volumen de perlas de EPS.

### 4.1. Introducción

Como se describe en el capítulo 3, en la sección 3.2, los materiales que se utilizan para estas pruebas son: arena sílica mal graduada, caolín y perlas de EPS. Las proporciones para las mezclas de los materiales están descritas en la tabla 3.3. El equipo de compactación utilizado para estas pruebas se describe en la sección 3.3.

En particular, para el *procedimiento de pruebas de compactación por impactos sin perlas de EPS* y el *procedimiento de pruebas de compactación por impactos con perlas de EPS* se utilizan tres variables, mismas que se mencionan y se describen a continuación:

- Contenido de agua: Es una cantidad de agua específica que se le agrega a una mezcla de suelo.
- La energía específica de compactación: Para realizar una comparativa y obtener un mayor número de datos representativos se utilizaron 3 energías diferentes, que se mencionan a continuación: 14.57, 18.21 y 21.86  $\frac{kg-cm}{cm^3}$ ; obtenidos con 32, 40 y 48 golpes, respectivamente.

- El volumen de perlas de EPS: Es el contenido de perlas que se le agrega a cada mezcla de suelo y está de acuerdo a lo mostrado en la tabla 3.3.

Todos los especímenes fueron compactados en ocho capas y en cada capa se realizó una distribución de golpes, como se observa en la figura 3.8. Para asegurar el control de los especímenes, sólo se aceptaron los que tenían entre 2 y 4 mm de altura saliente para enrasar.

## 4.2. Análisis y discusión de los resultados

En la etapa de resultados y de acuerdo a los procesos denominados: *procedimiento de pruebas de compactación sin perlas de EPS* y el *procedimiento de pruebas de compactación con perlas de EPS* se realizaron pruebas para obtener puntos comparativos y utilizando tres variables: energía de compactación, contenido de agua y perlas de EPS.

Asimismo, se muestran los resultados gráficos de cada etapa de ensaye en los que se observa el comportamiento de la mezcla, de acuerdo con las variables enunciadas en el párrafo anterior.

### 4.2.1. Resultados de las pruebas de compactación sin perlas de EPS

Con el *procedimiento de pruebas de compactación sin perlas de EPS* se realizaron especímenes para una mezcla de suelo compuesta por arena sílica mal graduada y 20 % de caolín. Con los datos obtenidos se determinaron las curvas de compactación  $\gamma_d - \omega$ . Asimismo, se hace la comparación con las tres energías de compactación mencionadas anteriormente. Los resultados se presentan en una gráfica como se observa en la figura 4.1.



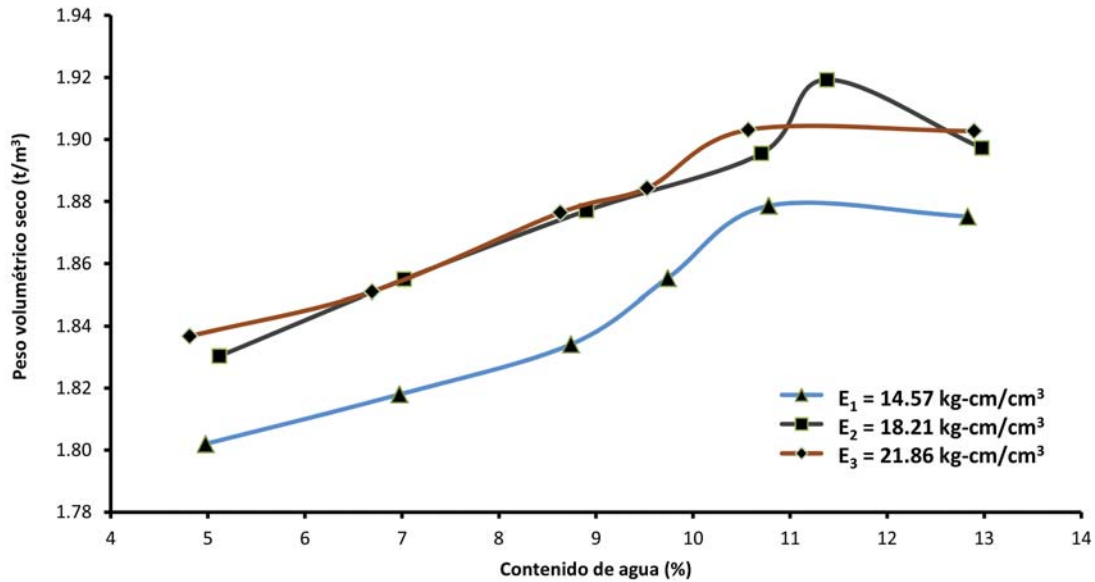


Figura 4.1: Curva de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20 % de finos

Es interesante observar y señalar que la mezcla de suelo presenta una curva de compactación  $\gamma_d - \omega$ , diferente a una campana, tal como sucede para otro tipo de suelos como una grava arenosa o arena limpia, que es el caso particular de esta tesis. Es decir, este material presenta una línea ascendente de acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio.

Asimismo, se observa que al incrementar las energías de compactación de 18.21 a 21.86  $\frac{\text{kg-cm}}{\text{cm}^3}$ , el comportamiento del material es similar, así como la tendencia al utilizar las tres energías diferentes.

#### 4.2.2. Resultados de las pruebas de compactación con perlas de EPS

Con el *procedimiento de pruebas de compactación con perlas de EPS* se ensayaron especímenes para una mezcla de suelo compuesta por: arena sílica mal graduada, 20 % de caolín con diferentes proporciones de EPS. Con los resultados obtenidos durante las pruebas de compactación y utilizando las tres variables antes mencionadas se determinaron las curvas de compactación  $\gamma_d - \omega$ .

A continuación se presentan los resultados de las mezclas de suelo-perlas de EPS en diferentes contenidos de: 0, 25, 50, 75 y 100 % en volumen; es decir: 0, 0.311, 0.608, 0.919 y 1.261 % con el peso de la mezcla de suelo (arena y caolín), como se observan en las figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5.

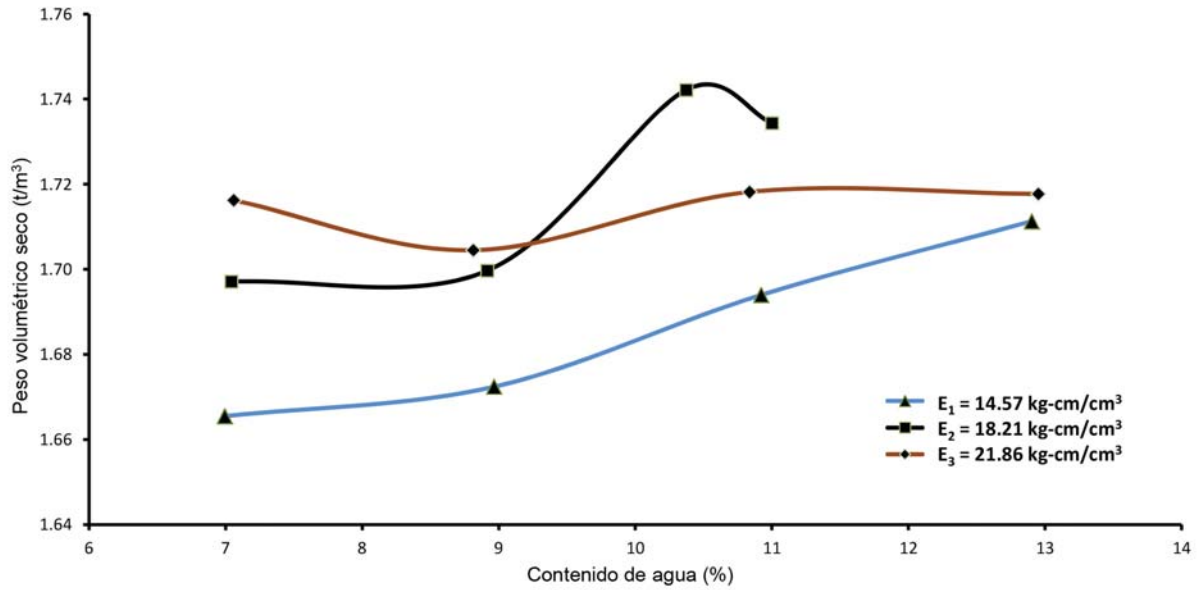


Figura 4.2: Curva de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20% de finos con 25% de perlas de EPS en volumen

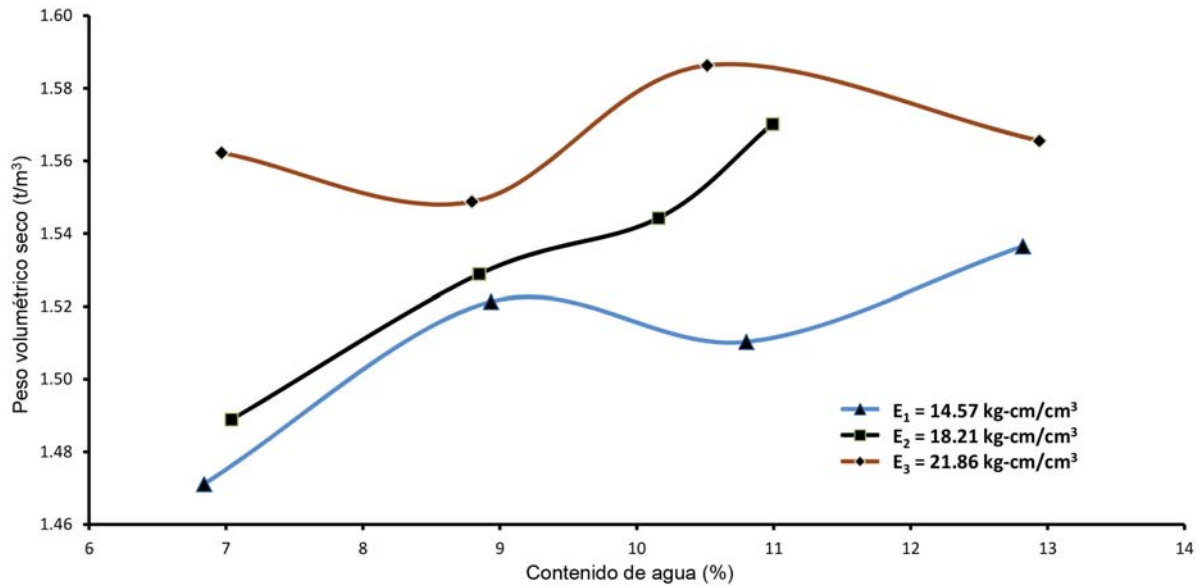


Figura 4.3: Curva de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20% de finos con 50% de perlas de EPS en volumen

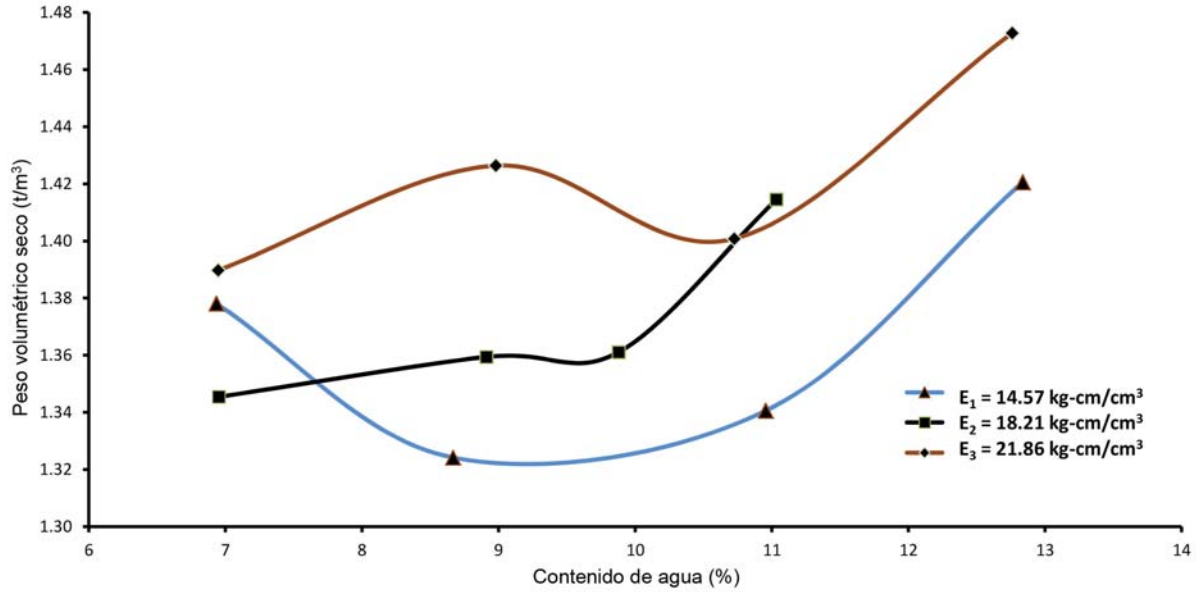


Figura 4.4: Curva de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20% de finos con 75% de perlas de EPS en volumen

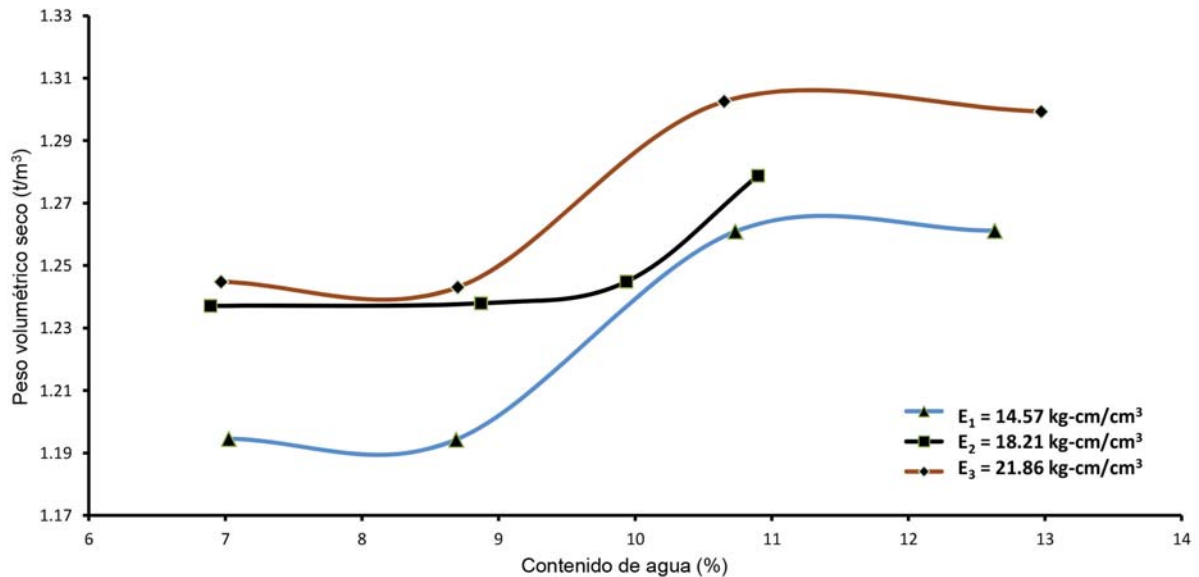


Figura 4.5: Curva de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20% de finos con 100% de perlas de EPS en volumen

Los resultados que se presentan en las figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, en las gráficas  $\gamma_d - \omega$ , no presentan ningún tipo de tendencia, esto se debe a que la mezcla de suelo contiene perlas de EPS (material no férreo) por lo que la tendencia es diferente comparada con la del suelo.

En la figura 4.6 se observa el resumen de los resultados de ambos procedimientos en los que se aplicaron tres energías de compactación y con los diferentes porcentajes de perlas de EPS, de acuerdo a la tabla 3.3.

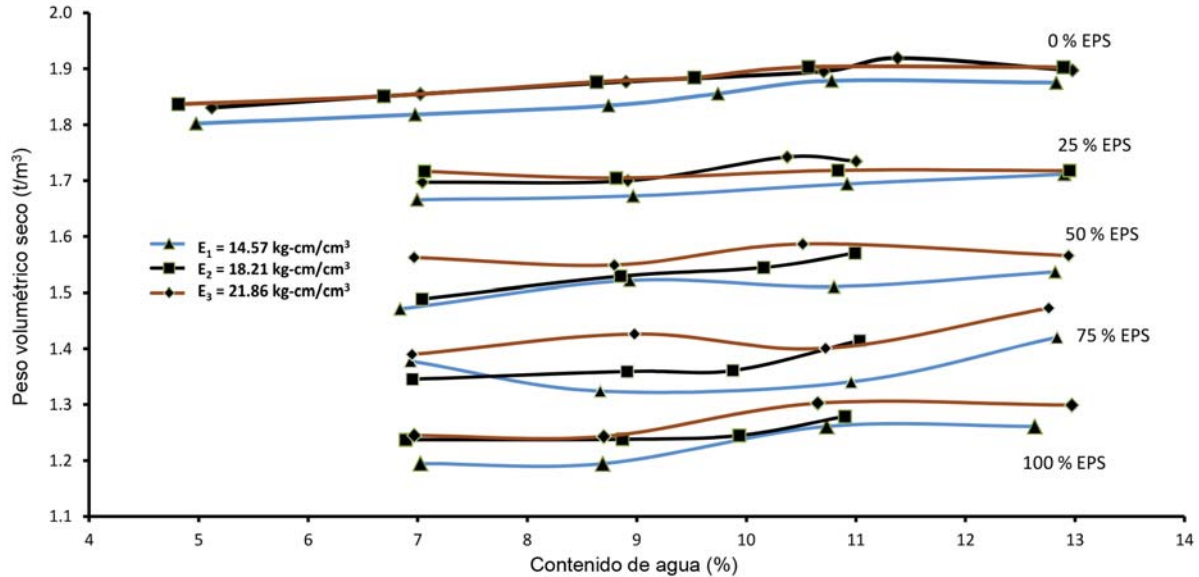


Figura 4.6: Curvas de compactación por impactos de una mezcla de arena + 20 % de finos y con diferentes contenidos de perlas de EPS en donde se utilizaron tres energías de compactación

Se observó directamente en el laboratorio que a la mezcla de arena + 20 % de caolín + % perlas de EPS, presenta cuatro zonas, mismas que se describen a continuación:

**Zona seca:** La zona seca está definida por un contenido de agua en un rango de 0 al 5 %. En esta zona el espécimen resultante presenta un homogenizado deficiente; además, presentan grietas y concentración de perlas de EPS como se muestra en las figuras 3.11 y 3.12.

**Zona húmeda:** La zona húmeda está definida por un contenido de agua en un rango de 7 al 9

**Zona óptima:** La zona óptima está definida por un contenido de agua óptimo de 10.5 al 11.5 %. En esta zona el espécimen resultante presenta un homogenizado satisfactorio; es decir, poca concentración de perlas de EPS. Además, el espécimen no presenta agrietamientos.

**Zona saturada:** La zona saturada está definida por un contenido de agua mayor al 12 %. En esta zona el espécimen presenta expulsión de agua y finos durante el ensaye de compactación por impactos.

Los resultados de la figura 4.6 que presentan las mezclas con perlas de EPS son prácticamente líneas horizontales; es decir, no influye de manera determinante la energía de compactación y el contenido de agua, ya que los pesos volumétricos presentan una variación mínima. Sin embargo,

al incrementar el contenido de perlas de EPS en la mezcla, se observa el efecto que tienen al disminuir significativamente los pesos volumétricos compactados.

Sin embargo, para observar mejor la influencia de las perlas de EPS en una mezcla de suelo, se aprecia que al normalizar los pesos volumétricos secos con perlas de EPS entre el peso volumétrico seco de la mezcla sin perlas de EPS (eje de las ordenadas) *versus* el contenido de perlas de EPS (eje de las abscisas), y además utilizar las variables: contenido de agua, energía de compactación y porcentaje de perlas en la mezcla de suelo, se alinean prácticamente en una misma recta, tal como se muestra en la figura 4.7.

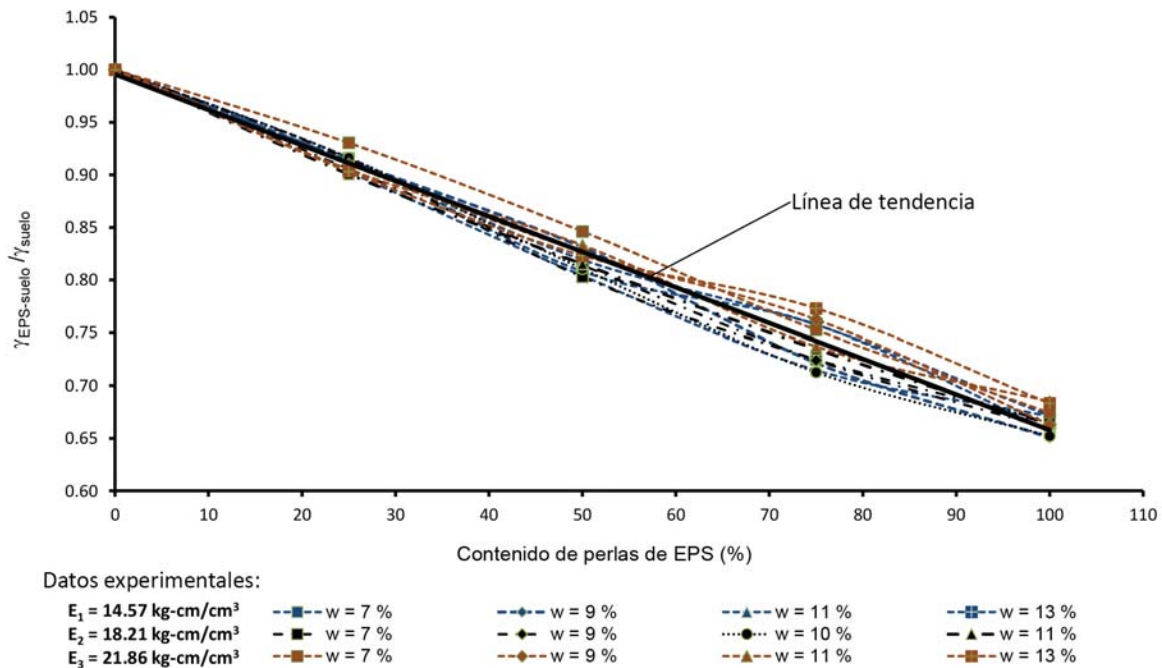


Figura 4.7: Línea de tendencia con mínimos cuadrados para ambos procesos de compactación por impactos

En la figura 4.7 se observa de una manera clara que existe una variación en el peso volumétrico de la mezcla al aumentar el contenido de perlas de EPS. Además, se observa que los resultados se presentan de una manera lineal, de tal forma que se obtiene una línea de tendencia respecto al  $\gamma_d$  compactado de la mezcla de suelo-perlas EPS con el método de *mínimos cuadrados* (línea negra) y el resultado se presenta con la ecuación 4.1.

$$\frac{\gamma_{EPSsuelo}}{\gamma_{suelo}} = (-0.034 * VP_{EPS} * 100) + 1 \quad (4.1)$$

donde:

$V_{PEPS}$  = Volumen de perlas de EPS

En las tablas 4.1 y 4.2 se presentan los resultados de manera breve que se obtuvieron en ambos procedimientos en la zona óptima, es decir, con un contenido de agua del 11 % para un peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ ) y un peso volumétrico húmedo ( $\gamma_m$ ), respectivamente.

Tabla 4.1: Resultados del  $\gamma_d$  en los procesos de compactación por impactos en la zona óptima (contenido de agua del 11 %)

% de perlas de EPS en volumen (%)	$E_1 = 14.57 \frac{kg-cm}{cm^3}$	$E_2 = 18.21 \frac{kg-cm}{cm^3}$	$E_3 = 21.86 \frac{kg-cm}{cm^3}$
	$\gamma_{dE1}$ $(\frac{t}{m^3})$	$\gamma_{dE2}$ $(\frac{t}{m^3})$	$\gamma_{dE3}$ $(\frac{t}{m^3})$
0	1.88	1.92	1.9
25	1.69	1.73	1.72
50	1.51	1.57	1.59
75	1.34	1.41	1.40
100	1.26	1.28	1.3
% total de peso reducido de 0 % a 100 %	32.91 %	33.66 %	31.5 %

Tabla 4.2: Resultados del  $\gamma_m$  en los procesos de compactación por impactos en la zona óptima (contenido de agua del 11 %)

% de perlas de EPS en volumen (%)	$E_1 = 14.57 \frac{kg-cm}{cm^3}$	$E_2 = 18.21 \frac{kg-cm}{cm^3}$	$E_3 = 21.86 \frac{kg-cm}{cm^3}$
	$\gamma_{mE1}$ $(\frac{t}{m^3})$	$\gamma_{mE2}$ $(\frac{t}{m^3})$	$\gamma_{mE3}$ $(\frac{t}{m^3})$
0	2.08	2.14	2.10
25	1.88	1.93	1.90
50	1.67	1.74	1.75
75	1.49	1.57	1.55
100	1.40	1.42	1.44
% total de peso reducido de 0 % a 100 %	32.69 %	33.64 %	31.42 %

En resumen, las tablas 4.1 y 4.2 muestran que al incrementar el contenido de perlas de EPS a la mezcla de suelo, es decir, de un 0 a 100 % de perlas de EPS en volumen, se obtiene como resultado la disminución del peso volumétrico seco hasta en 32 % menos en promedio respecto a la mezcla que no contiene perlas de EPS. En la figura 4.7 se observa también la disminución en porcentaje de acuerdo a cada proporción de perlas de EPS con respecto al peso volumétrico de una mezcla que no contiene perlas de EPS.

También se observa en las tablas 4.1 y 4.2 que al utilizar la energía de compactación  $E_2$  y  $E_3$ , los resultados de los pesos volumétricos son similares, es decir, las variaciones no fueron significativas.

De acuerdo a Romo *et al.* [4] en los resultados que obtuvo en los ensayos triaxiales como lo muestra la figura 2.18, el material con un contenido alto de perlas de poliestireno puede presentar un comportamiento dúctil; es decir, el material se acomodará de acuerdo a los asentamientos ocasionados por el peso propio del terraplén sin sufrir daños importantes como puede ser en el agrietamiento.

# Capítulo 5

## Aplicación de mezclas de suelo-perlas de EPS en un terraplén

El objetivo del presente capítulo es mostrar el análisis de asentamientos elásticos (inmediatos) y de asentamientos por consolidación (diferidos) para mezclas de suelo con y sin perlas de EPS en diferentes proporciones. Los análisis de los asentamientos se realizaron con un programa de diferencias finitas.

Con base en los resultados obtenidos se analiza y se discute la influencia que tienen las perlas de EPS en los asentamientos elásticos y en los asentamientos al 100 % de consolidación.

### 5.1. Introducción

Actualmente una de las formas para resolver los retos geotécnicos es a través de la modelación geotécnica, es decir, el uso de códigos de elementos finitos o diferencias finitas. Para esta tesis se eligió el código FLAC por sus características de potencia y flexibilidad.

FLAC (ITASCA 2006) es un programa bidimensional de diferencias finitas donde se simula el comportamiento de las estructuras constituidas por tierra, rocas u otros materiales que puedan sufrir una deformación plástica. El programa cuenta con varios modelos constitutivos para permitir la simulación del comportamiento común de materiales geológicos [51].

#### 5.1.1. Leyes constitutivas empleadas

El comportamiento de las arenas y las arcillas encontradas en el sitio de estudio se representa mediante el modelo Mohr-Coulomb y para el caso del terraplén se representa mediante el modelo elástico. Ambos modelos se describen a continuación:



- **Modelo Mohr-Coulomb:** El modelo Mohr Coulomb es un modelo convencional que toma en cuenta las deformaciones plásticas y considera un comportamiento bilineal del suelo definido por los parámetros que se mencionan enseguida:
  - Resistencia de cohesión ( $c$ )
  - Ángulo de fricción interna ( $\phi$ )

En la rama elástica, el módulo de compresibilidad volumétrica,  $K$ , y el módulo de rigidez al cortante,  $G$ , son considerados constantes. Los parámetros  $K$  y  $G$  se determinan en función del módulo de *Young*,  $E$ , obtenido de pruebas triaxiales de compresión y extensión, y la relación de *Poisson*,  $\nu$ , con las ecuaciones 5.1 y 5.2.

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (5.1)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (5.2)$$

- **Modelo elástico:** El modelo elástico, es una representación simple del comportamiento del material. Este modelo es válido para materiales isotrópicos homogéneos y continuos que presentan un comportamiento esfuerzo deformación lineal.

## 5.2. Caso de aplicación a un terraplén

El terraplén consta de una sección trapezoidal simétrica consta de una altura de 3.5 m, una corona de 4 m y una pendiente 2(H):1(V) tal como se observa en la figura 5.1.

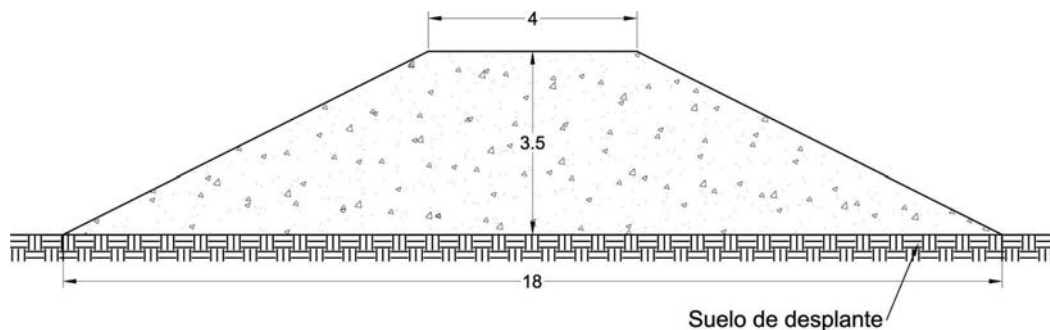


Figura 5.1: Terraplén simétrico propuesto

Para el cálculo de asentamientos elásticos y asentamientos por consolidación, se proponen datos de una estratigrafía típica del Distrito Federal con sus respectivas propiedades de compresibilidad. El sitio idealizado se localiza en la zona denominada *zona de lago*. Esta zona se caracteriza



principalmente por arcillas blandas a muy blandas con baja resistencia al esfuerzo cortante y la alta compresibilidad. Las propiedades del suelo se muestran en un perfil idealizado como se observa en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Estratigrafía propuesta

Tipo de estrato	Profundidad (m)	$\gamma_m$ ( $\frac{t}{m^3}$ )	Cohesión (c) ( $\frac{t}{m^2}$ )	$\phi$ grados	Módulo elástico, E ( $\frac{kg}{cm^2}$ )	Módulo elástico efectivo, E ( $\frac{kg}{cm^2}$ )
Costra superficial	0.0 - 1.2	1.6	0	30	25	25
Formación arcillosa superior	1.2 - 13.2	1.3	4.59	0	38.8	4.59
Capa dura	13.2 - 14.0	1.6	0	30	200	200
Formación arcillosa inferior	14.0 - 37.8	1.25	17.28	0	76.92	17.28
Depósitos profundos	37.8 - 40.0	1.6	0	30	700	700

El material del terraplén presenta un contenido de agua del 11 % y una energía de compactación de:  $E_2 = 18.21 \frac{kg-cm}{cm^3}$ ; de acuerdo a la tabla 4.2. Con esta información se obtienen las presiones de contacto al centro del terraplén, como se observa en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Presiones de contacto al centro del terraplén

% de volumen en perlas de EPS	Presión de contacto ( $\frac{t}{m^2}$ )
0	7.5
25	6.8
50	6.1
75	5.5
100	5

De acuerdo con los datos que se obtienen del perfil idealizado en la tabla 5.1, y el peso volumétrico de las diferentes mezclas de suelo-perlas de EPS como se observa en la tabla 4.2; se realiza la solución por medio de diferencias finitas. El modelo propuesto en el programa se muestra en la figura 5.2.

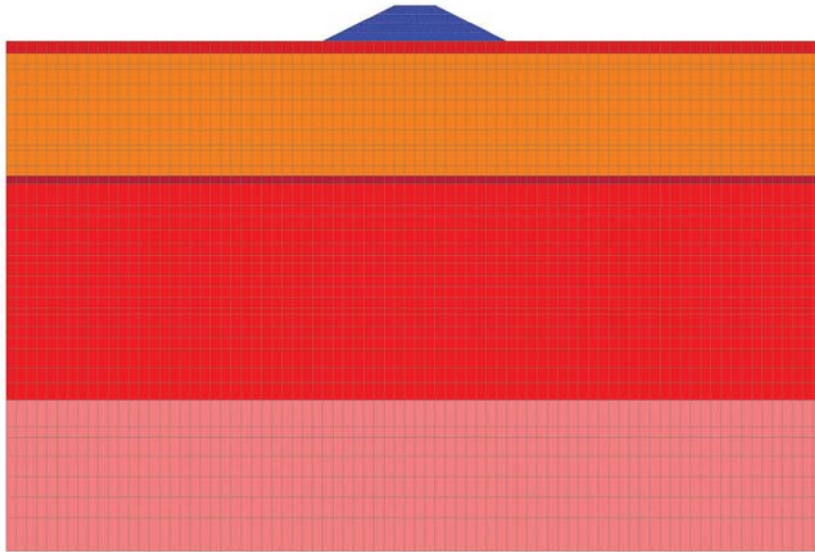


Figura 5.2: Modelo propuesto para el cálculo de asentamientos en el programa FLAC

### 5.3. Análisis y discusión de los resultados

A continuación se presenta el análisis y la discusión de los resultados obtenidos para el cálculo de los asentamientos elásticos y los asentamientos por consolidación.

Los resultados que se presentan en la tabla 5.3 corresponden a los asentamientos elásticos y por consolidación al 100 %, al centro de la estructura. Los resultados presentan diferentes contenidos de perlas EPS.

Tabla 5.3: Resultados de asentamientos al centro del terraplén

% porcentaje de volumen en perlas de EPS	Asentamiento elásticos (cm)	Asentamiento por consolidación (m)	Asentamientos totales (m)
0 %	15.2	3.07	3.22
25 %	13.6	2.63	2.76
50 %	12.3	2.26	2.38
75 %	11.1	1.95	2.06
100 %	9.9	1.69	1.79

En las figuras 5.3, 5.4 y 5.5, se presentan los resultados de los asentamientos inmediatos, por consolidación y finalmente los totales en la base del terraplén.

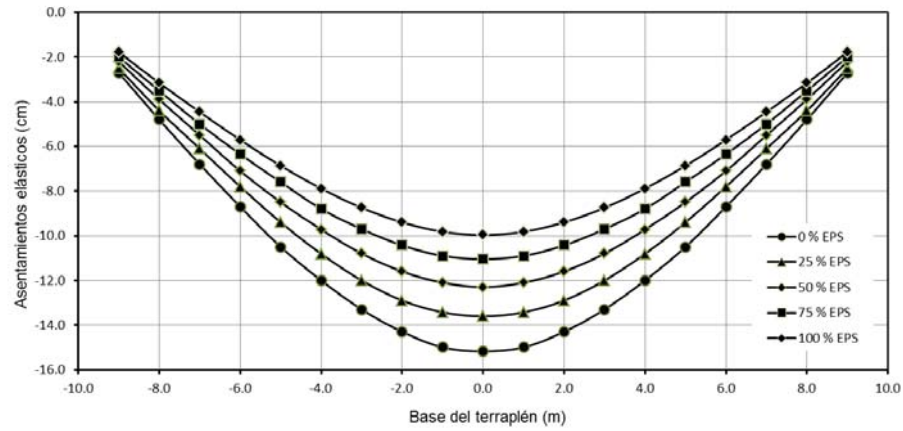


Figura 5.3: Asentamientos elásticos del terraplén para diferentes contenidos de perlas de EPS, en volumen

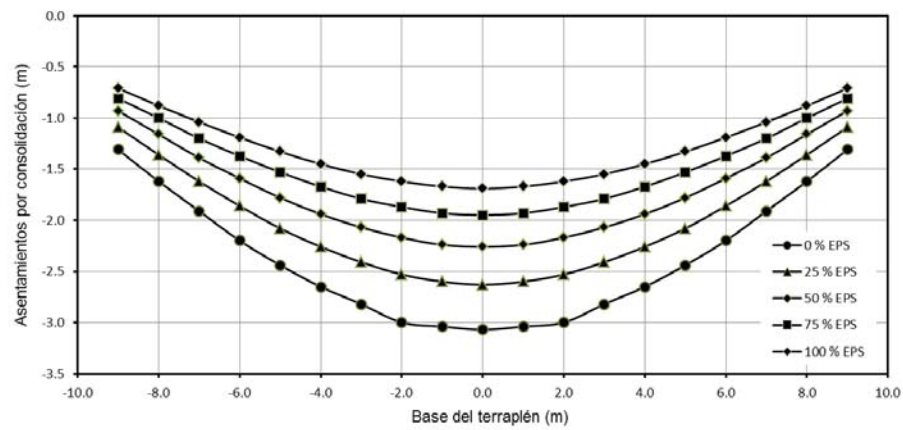


Figura 5.4: Asentamientos por consolidación del terraplén para diferentes contenidos de perlas de EPS, en volumen

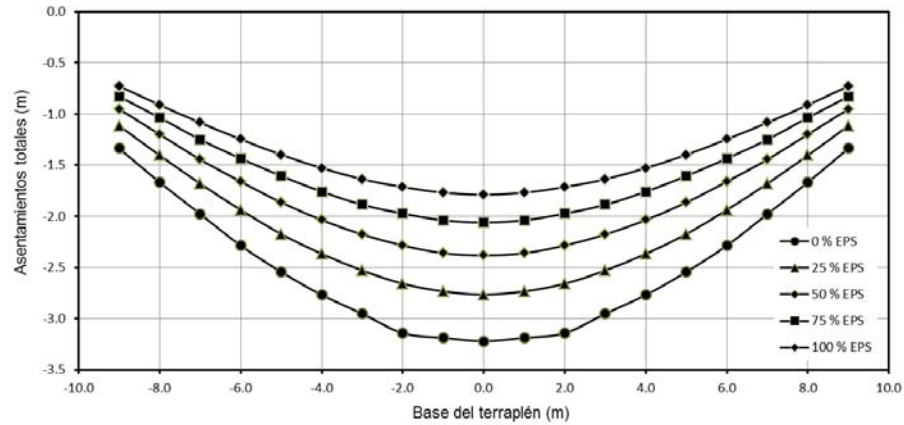


Figura 5.5: Asentamientos totales del terraplén para diferentes contenidos de perlas de EPS, en volumen

De acuerdo con los resultados obtenidos se observa una notable disminución en los asentamientos elásticos y por consolidación al centro del terraplén. En la tabla 5.4, se presentan los resultados en donde se muestra una disminución de asentamientos totales en un 45 % menos respecto a la mezcla que no contiene perlas de EPS.

Tabla 5.4: Disminución de asentamientos al centro del terraplén, respecto al suelo natural compactado

% perlas de EPS en volumen (%)	Asentamientos elásticos (%)	Asentamientos por consolidación (%)	Asentamientos totales (%)
0	0	0	0
25	10.3	14.3	14.3
50	18.9	26.4	26.1
75	26.8	36.5	36.0
100	34.1	45.0	44.4

# Conclusiones y recomendaciones

## Conclusiones

- Es de suma importancia la normalización de procedimientos “estándar” para ensayos de laboratorio con elementos aligerantes (no térreos).
- Se logró diseñar un proceso de compactación por impactos a través del cual es posible utilizar perlas de EPS (elemento aligerante), pero que además se puede utilizar con elementos similares como lo pueden ser los residuos triturados de EPS.
- En la mezcla de suelo-perlas de EPS se identificaron tres zonas específicas que se caracterizan por sus contenidos de agua. Esto es importante identificar las zonas en la que se pueda encontrar la mezcla de acuerdo al contenido de agua y al homogenizado del espécimen (suelo-perlas de EPS) y así obtener especímenes adecuados para futuras pruebas mecánicas. Además es importante definir el contenido de agua óptimo y la energía de compactación adecuada en donde la mezcla suelo-perlas de EPS presente las condiciones más favorables.
- Al utilizar diferentes proporciones en volumen de perlas de EPS los resultados indican la disminución en el peso volumétrico seco del orden de 32 % menos en promedio respecto al peso volumétrico seco de una mezcla que no contiene perlas de EPS. Además, se obtuvo una expresión de acuerdo a la disminución del peso volumétrico seco compactado,  $\gamma_d$ , que puede representar la mezcla de suelo-perlas de EPS.
- Al simular una posible aplicación de las mezclas de suelo con perlas de EPS en diferentes proporciones en volumen a un terraplén simétrico sobre estratigrafía idealizada y similar a la del Distrito Federal, los resultados que se obtuvieron fueron altamente satisfactorios, porque se presenta una disminución de asentamientos del orden de un 46 % menos respecto a una mezcla de suelo sin perlas de EPS.
- Existen alternativas en el tema de la compactación de suelos, como el aligeramiento de suelos compactados con EPS (elementos no térreos y aligerantes), es por esto, la importancia de continuar con las investigaciones para determinar el comportamiento de la mezcla de suelo-perlas de EPS.



- En caso de que la mezcla de suelo-perlas de EPS presente un comportamiento dúctil, el mantenimiento para este tipo de estructuras que se requiere, será en lapsos de tiempo mayor comparado con una estructura que no contiene perlas de EPS.
- Por todo lo anterior, este es un tema trascendente tanto en la investigación como en la práctica, el cual deberá continuar en estudio e indagación.

## Recomendaciones

- Se recomienda realizar ensayos de prueba previas para definir las zonas del comportamiento del material y así obtener resultados satisfactorios y reproducibles.
- Fué un reto muy difícil realizar la mezcla de suelo-perlas de EPS en el laboratorio bajo condiciones óptimas, ya que el homogenizado en los primeros intentos no fué muy satisfactorio. Además, al tratar de realizar esta mezcla en campo, probablemente sea un reto extremadamente complicado, ya que al tener variables como el tamaño de las perlas, la temperatura, el viento, el equipo, entre otros, sea casi imposible realizar un homogenizado satisfactorio, es por esto que se recomienda realizar pruebas en laboratorio y en campo de una mezcla de suelo con bloques triturado de EPS.
- Para evitar el efecto de flotación en una posible estructura se recomienda que el peso volumétrico compactado de la mezcla de suelo-perlas de EPS deba ser mayor a  $1 t/m^3$ .

# Referencias

- [1] A. Ossa. *Comportamiento mecánico del poliestireno expandido (EPS) bajo carga de compresión*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2009.
- [2] A. Ossa y M.P. Romo. Micro-and macro-mechanical study of compressive behavior of expanded polystyrene geofoam. *Geosynthetics International*, 16(5):327–338, 2009.
- [3] A. Ossa y M.P. Romo. Dynamic characterization of EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(1):40–50, 2011.
- [4] M. P. Romo, A. Ossa, y O. Flores. *Terraplén aligerado usando mezclas de suelo con perlas de poliestireno expandido, EPS*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2011.
- [5] MJ Mendoza. Enfoques recientes en la compactación de suelos. *Publicación técnica*, (33), 1992.
- [6] W.E. Doolittle y L.I. Castillo. *Canales de riego en el México prehistórico: La secuencia del cambio tecnológico*. Universidad Autónoma Chapingo, 2004.
- [7] R.R. Proctor. Fundamental principles of soil compaction. *Engineering News Record*, 111 (9):245–248, 1933a.
- [8] R.R. Proctor. Description of field and laboratory methods. *Engineering News Record*, 111 (10):286–289, 1933b.
- [9] R.R. Proctor. Field and laboratory verification of soil suitability. *Engineering News Record*, 111(11):348–351, 1933c.
- [10] R.R. Proctor. New principles applied to actual dam-building. *Engineering News-Record*. September, 28:372–376, 1933d.
- [11] Alfonso Rico Rodríguez y Hermilo Del Castillo. *Ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas*, volume 1. Editorial Limusa S.A. de C.V., 1999.
- [12] J. Alberro, R.J. Marsal, y M.J. Mendoza. *Comportamiento de suelos compactados*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1985.



- [13] J. Alberro, R.J. Marsal, M.J. Mendoza, y F. Náder. *Comportamiento de suelos compactados–Primer Informe*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1978.
- [14] J. Alberro, R.J. Marsal, M.J. Mendoza, y F. Náder. *Comportamiento de suelos compactados–Segundo Informe*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1979.
- [15] J. Alberro, G. Hiriart, R.J. Marsal, M.J. Mendoza, y F. Náder. *Comportamiento de suelos compactados–Tercer Informe*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1980.
- [16] J. Alberro, G. Hiriart, R.J. Marsal, M.J. Mendoza, y F. Náder. *Comportamiento de suelos compactados–Cuarto Informe*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1982.
- [17] J. Alberro, G. Hiriart, R.J. Marsal, M.J. Mendoza, y F. Náder. *Comportamiento de suelos compactados–Quinto Informe*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1982a.
- [18] J. Alberro, G. Hiriart, R.J. Marsal, M.J. Mendoza, y F. Náder. *Comportamiento de suelos compactados–Sexto Informe*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1982b.
- [19] M.J. Mendoza. Condiciones que influyen en los resultados de las pruebas de compactación de suelos. *XIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos: Mazatlán*, 1(2):9–23, 1986.
- [20] J.S. Horvath. *Geofoam geosynthetic: A monograph*. 1995.
- [21] J. S. Horvath. Expanded polystyrene (EPS) geofoam: an introduction to material behavior. *Geotextiles and Geomembranes*, 13(4):263–280, 1994.
- [22] ASTM-C-578-10. Standard specification for rigid, cellular polystyrene thermal insulation. *American Society for Testing and Materials*, 2010.
- [23] ASTM-D-6817-07. Standard specification for rigid cellular polystyrene geofoam. *American Society for Testing and Materials*, 2007.
- [24] B.S. Chun, H.S. Lim, M. Sagong, y K. Kim. Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 22(4):223–237, 2004.
- [25] T. Preber, S. Bang, Y. Chung, y Y. Cho. Behavior of expanded polystyrene blocks. *Transportation research record*, (1462):36–46, 1994.
- [26] Timothy D. Stark, D. Arellano, J.S. Horvath, y D. Leshchinsky. *Geofoam applications in the design and construction of highway embankments*. Technical report, 2004.
- [27] G.A. Athanasopoulos, P.C. Pelekis, y V.C. Xenaki. Dynamic properties of EPS geofoam: An experimental investigation. *Geosynthetics International*, 6:171–194, 1999.
- [28] A.C. Trandafir, S.F. Bartlett, y B.N. Lingwall. Behavior of EPS geofoam in stress-controlled cyclic uniaxial tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(6):514–524, 2010.
- [29] M. Duškov. Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures. *Geotextiles and Geomembranes*, 15(1):147–181, 1997.

- [30] S. Srirajan, D. Negussey, y N. Anasthas. Creep behavior of EPS geofoam. In *Proceedings of the Third International Conference on EPS—EPS Geofoam*, 2001.
- [31] D. Negussey y M. Jahanandish. Comparison of some engineering properties of expanded polystyrene with those of soils. *Transportation research record*, (1418):43–50, 1993.
- [32] J.S. Horvath. Mathematical modeling of the stress-strain-time behavior of geosynthetics using the findley equation: General theory and application to EPS-block geofoam. *Res. Rep. CE/GE-98-3, Manhattan College, New York (USA)*, 1998.
- [33] H. Wong y C.J. Leo. A simple elastoplastic hardening constitutive model for EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(5):299–310, 2006.
- [34] H. Hazarika. Stress–strain modeling of EPS geofoam for large-strain applications. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(2):79–90, 2006.
- [35] A. Kan y R. Demirboğa. A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(6):2994–3000, 2009.
- [36] D.Y. Najmaddin y H. Canakci. Compaction properties of sand mixed with modified waste EPS. *Geotechnical and Geological Engineering*, pages 1–4.
- [37] G. Beinbrech y R. Hillmann. EPS in road construction—current situation in germany. *Geotextiles and Geomembranes*, 15(1):39–57, 1997.
- [38] D. Negussey. Putting polystyrene to work. *Civil Engineering*, 68(3), 1998.
- [39] J.S. Horvath. The compressible inclusion function of EPS geofoam: an overview. In *Proceedings of International Symposium on EPS (EXPANDED POLY-STYROL) Construction Method (EPS TOKYO’96)*, 1996.
- [40] J.S. Horvath. The compressible inclusion function of EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, 15(1):77–120, 1997.
- [41] J.S. Horvath. Lessons learned from failures involving geofoam in roads and embankments. *Research Rep. No. CE/GE-99*, 1, 1999.
- [42] X. Huang. Evaluation of EPS geofoam as subbase/subgrade material in pavement structures. 2006.
- [43] A.F. Elragi. Selected engineering properties and applications of EPS geofoam. 2006.
- [44] H. Liu, A. Deng, y J. Chu. Effect of different mixing ratios of polystyrene pre-puff beads and cement on the mechanical behaviour of lightweight fill. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(6):331–338, 2006.
- [45] G.L. Yoonz, S.S. Jeon, y B.T. Kim. Mechanical characteristics of light-weighted soils using dredged materials. *Marine Georesources and Geotechnology*, 22(4):215–229, 2004.

- [46] Y. Gao, S. Wang, y C. Chen. A united deformation-strength framework for lightweight sand–EPS beads soil (lSES) under cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(8):1144–1153, 2011.
- [47] A. Deng y Y. Xiao. Measuring and modeling proportion-dependent stress-strain behavior of EPS-sand mixture 1. *International Journal of Geomechanics*, 10(6):214–222, 2010.
- [48] R.L. Heller y O. de Sola. *Geología y ciencias afines*. México (México). Hispano Americano, 1967.
- [49] R.E. Grim. *Clay Mineralogy McGraw-Hill*, volume 467. 1968.
- [50] M.J. Mendoza. Comunicación personal, 2013.
- [51] P.A. Cundall. Flac user manual, 2008.