



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Evaluación de las propiedades mecánicas del poliestireno expandido

Natalia Pérez García
Paul Garnica Anguas
Alfonso Pérez Salazar
Raquel Juárez Hidalgo
Federico Castro Mondragón

**Publicación Técnica No. 476
Sanfandila, Qro., 2016**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Evaluación de las propiedades mecánicas del
poliestireno expandido**

Publicación Técnica No. 476
Sanfandila, Qro., 2016

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Natalia Pérez García, el Dr. Paul Garnica Anguas, el Ing. Alfonso Pérez Salazar, Raquel Juárez Hidalgo (estudiante del Instituto Tecnológico de Pachuca) y Federico Castro Mondragón (estudiante de la Universidad Politécnica de Querétaro).

Contenido

Resumen	v
Abstract	vii
Resumen ejecutivo	ix
Introducción	1
Descripción del problema y justificación	1
Objetivos del trabajo	2
Organización del trabajo	2
1. Antecedentes sobre el uso del poliestireno expandido (EPS)	3
1.1. Composición del poliestireno expandido (EPS)	3
1.2. Proceso de manufacturación	3
1.3. Primer uso del poliestireno expandido	5
1.4. Funciones del EPS	7
1.5. Ventajas y desventajas del EPS	7
1.6. Propiedades físicas y mecánicas del EPS	8
1.7. Factores que afectan la determinación de las propiedades del EPS	17
1.8. Casos históricos de fallas	21
2. Especificaciones del EPS	29
2.1. Evolución de la normativa para el EPS	29
2.1.1. Norma NCHRP 24-11	29
2.1.2. Norma ASTM D6817-07	34
3. Materiales y procedimientos de prueba	35
3.1. Materiales	35
3.2. Preparación de los especímenes	35
3.2.1. Muestras para resistencia a compresión, módulo de resiliencia y deformación permanente	35
3.2.2. Muestra para la prueba de flexión	39
3.3. Procedimientos de prueba	39
3.3.1. Resistencia a compresión (ASTM D1621-10)	39
3.3.2. Resistencia a flexión	40
3.3.3. Módulo de resiliencia	41
3.3.4. Deformación permanente	44
4. Resultados	47
4.1. Resistencia a compresión	47
4.2. Resistencia a flexión	50
4.3. Módulo de resiliencia	52
4.4. Deformación permanente	54
4.4.1. Prueba en una fase de carga	54
4.4.2. Prueba en cuatro fases	55
5. Conclusiones	57

Resumen

En esta investigación fueron evaluados los módulos de resiliencia, la deformación permanente, el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad de muestras de poliestireno expandido, con dos diferentes densidades.

Los resultados indicaron que los módulos de elasticidad de las muestras de ambas densidades son similares a los reportados en la literatura y en la normativa ASTM D6817-07. Por otro lado, el módulo de ruptura sí indica diferencias a las reportadas en literatura, esto quizá se deba a que se utilizaron vigas de dimensiones mayores a las indicadas en la norma ASTM D 6817-07.

Con respecto a los módulos de resiliencia, estos no se ven afectados en gran medida por el confinamiento en ambas densidades. El módulo de resiliencia sí depende del esfuerzo desviador para la densidad más baja; para mayor densidad el efecto es muy ligero.

Finalmente, en las muestras con densidad 29 kg/m^3 , no se acumula deformación permanente si los niveles de esfuerzo aplicados se encuentran en el rango elástico.

Abstract

This document shows an investigation on EPS geofoam. Properties such as resilient modulus, permanent deformation, rupture modulus and elastic modulus were evaluated in samples of two densities.

The results indicated that the elastic modulus of both densities is similar to those shown in literature and the ASTM D6817-07 standard. On the other hand, the rupture modulus differs from the values already indicated. A probable reason is that the samples utilized in the testing were of different dimensions of those indicated in the ASTM D 6817-07.

Regarding the resilient modulus, this parameter is almost independent of confining pressure. The deviator stress affects more to those specimens of lower density.

Finally, permanent deformation was measured in samples of 29 kg/m^3 of density. It was observed that the sample does not accumulate permanent deformation as long as applied stress is in the elastic range.

Resumen ejecutivo

En los últimos años, el avance de la tecnología en todos los campos del conocimiento ha sido extraordinario; y el campo de la ingeniería civil no es la excepción. En ésta se usan nuevos materiales y tecnologías para llevar a cabo obras más durables. Particularmente, en países que presentan problemáticas especiales de suelos blandos y problemas de congelamiento-deshielo, desde los años setenta se ha introducido en la construcción de carreteras el material conocido como “bloques de EPS o poliestireno expandido”. En el caso de los países en los que se tiene el problema de congelamiento-deshielo, se trató de utilizar de tal forma que el pavimento tuviera un sistema de aislamiento. Por el otro lado, en el caso de zonas con materiales blandos, el EPS es colocado como relleno para que los niveles de esfuerzo que se transmiten al terreno de cimentación sean muy bajos, para reducir así asentamientos.

Sin embargo, la introducción de un nuevo material de construcción no es tarea fácil, ya que el ingeniero -por su naturaleza analítica- generalmente se muestra escéptico ante las nuevas tecnologías. Por lo tanto, antes de utilizar un material reciente, él debe comprobar si este nuevo producto ha sido usado de forma exitosa y, cuando ha fallado, por qué ha sucedido.

El EPS es muy usado en Estados Unidos y Europa, pero en México son pocas las obras en las que ha sido empleado. Una de las razones puede ser el desconocimiento de sus propiedades y de su comportamiento. Por tal motivo, en el Instituto Mexicano del Transporte se llevó a cabo un estudio en donde fueron evaluadas las propiedades del EPS.

En el trabajo, se presentan primeramente los antecedentes del uso del EPS. En este resumen vemos cómo fueron los primeros usos de este material en la construcción de rellenos. Se indica cómo se lleva a cabo su fabricación; las ventajas y desventajas de uso. Se muestran diferentes propiedades medidas por varios autores. También se hace una reseña de cómo se elaboraron las especificaciones del EPS.

Posteriormente se describen los materiales de EPS utilizados en el estudio. Se enumeran los procedimientos tanto para la formación de los especímenes como los procedimientos de prueba utilizados en la determinación de las propiedades mecánicas.

Enseguida, se discuten los resultados obtenidos. En estos se observó que los módulos de elasticidad del EPS medidos en muestras de ambas densidades son similares a los obtenidos en los estudios ya publicados. Por otro lado, en cuanto a resultados de módulo de resiliencia, se encontró que éstos dependen muy poco de

los niveles de confinamiento aplicados en la prueba. También se observó que en los especímenes de mayor densidad, el efecto del esfuerzo desviador es muy bajo, ya que las curvas tienden a la horizontal.

Analizando más a detalle la información de módulo de resiliencia, y en especial, graficando los ciclos histeréticos, se obtiene que el EPS de mayor densidad amortigua menos, ya que el área de los ciclos histeréticos es inferior a la obtenida en el EPS de menor densidad.

En cuanto a deformación permanente, varias muestras cilíndricas de 7.1 cm de diámetro por 14.4 cm de altura se sometieron a carga cíclica (20,000 ciclos). Las pruebas se realizaron con un nivel de carga y un nivel de confinamiento, o con cuatro fases de carga y confinamiento constante.

Los resultados de las pruebas de deformación indicaron que los especímenes no acumulan deformación permanente, si la carga aplicada está dentro del rango elástico. Esto se observó para pruebas en las que aplicó una o cuatro fases de carga.

Introducción

En los últimos años, el avance de la tecnología en todos los campos del conocimiento ha sido extraordinario; y el campo de la ingeniería civil no es la excepción. En ésta se están usando nuevos materiales y tecnologías para llevar a cabo obras más durables. En especial, en países que presentan problemáticas particulares de suelos blandos y problemas de congelamiento-deshielo, desde los años setenta han introducido en la construcción de carreteras el material conocido como “bloques de EPS o poliestireno expandido”. En el caso de los países en los que existe el problema de congelamiento-deshielo, lo trataron de utilizar de tal forma que el pavimento tuviera un sistema de aislamiento. Por el otro lado, en el caso de zonas con materiales blandos, el EPS es empleado como relleno para que los niveles de esfuerzo que se transmiten al terreno de cimentación sean muy bajos, para reducir así los asentamientos. Sin embargo, la introducción de un nuevo material de construcción no es tarea fácil, ya que el ingeniero -por su naturaleza analítica- se muestra por lo general escéptico ante las nuevas tecnologías. Por lo tanto, antes de utilizar un nuevo material, él debe comprobar si este producto ha sido usado de forma exitosa y, cuando ha fallado, bajo qué condiciones ha sucedido.

Si en una obra se utiliza un nuevo material, la responsabilidad de la funcionalidad recaerá directamente sobre el ingeniero que propone su uso; por lo que en la mayoría de los casos es preferible no emplear un material desconocido.

Descripción del problema y justificación

El uso de cualquier material de construcción nuevo -y en especial los materiales para construcción de pavimentos- primeramente requiere que sea comprobada su confiabilidad o cuáles son las ventajas de utilizarlo. El EPS es un producto innovador que ha sido utilizado bastante en la construcción en países como Noruega, Japón y Estados Unidos. En México, son pocas obras en las que ha sido empleado y esto quizá se deba al desconocimiento de sus propiedades.

Objetivos del trabajo

Objetivo general

El objetivo de este documento es presentar los antecedentes del uso del EPS, como material de construcción, en carreteras. Además, mostrar las propiedades mecánicas del EPS de dos densidades.

Objetivos específicos

1. Llevar a cabo la revisión bibliográfica sobre el tema.
2. Determinar las propiedades físicas del EPS.
3. Preparación de los materiales para determinar la resistencia a compresión y el módulo elástico.
4. Preparación de especímenes para determinación de módulo de resiliencia.
5. Preparación de especímenes para determinación de la deformación permanente.

Organización del trabajo

El trabajo está conformado de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se muestran los antecedentes del uso del EPS en varios países. También se resumen las propiedades mecánicas y físicas que se han determinado. Asimismo se presentan algunos tipos de fallas que se han ocurrido en algunas obras.

El capítulo 2 es un resumen de las especificaciones que deben de cumplir los EPS geofoam de acuerdo con la normativa ASTM y NCHRP. También se presenta un breve resumen de cómo fueron formuladas las especificaciones publicadas en el documento NCHRP 24-11(01).

El capítulo tres describe los EPS estudiados y los procedimientos de prueba seguidos para determinar las propiedades mecánicas.

En el capítulo 4 se detallan y discuten los resultados obtenidos, para finalmente presentar las conclusiones.

1 Antecedentes sobre el uso del poliestireno expandido (EPS)

1.1. Composición del poliestireno expandido (EPS)

En 1839, el farmacéutico alemán Eduard Simon descubrió el poliestireno. El aisló la sustancia de una resina natural pero no se dio cuenta de lo que había descubierto. Otro químico alemán, Hermann Staudinger, se percató de que el descubrimiento de Simon comprendía cadenas largas de moléculas de estireno y que era un polímero plástico. En 1922, Staudinger publicó sus teorías sobre polímeros y declaró que los cauchos naturales estaban formados por cadenas repetitivas de monómeros que daban la elasticidad al material, e indicó que los materiales formados por un proceso térmico del estireno eran similares al caucho (Bellis, s.f.). El poliestireno es el polímero con el que es fabricado el poliestireno expandido (en adelante se designa como EPS).

Existen dos tipos de poliestireno y colectivamente son conocidos como poliestireno celular rígido (RCPS). En geotecnia los llaman poliestireno expandido (EPS) y poliestireno extruido (XPS). El primero es fabricado en planta, de tal forma que tenga la textura de una capa individual y se fusiona de forma térmica. Generalmente su color es blanco, pero en países como Canadá y el Reino Unido le dan color con propósitos de mercadotecnia. Por otro lado, el XPS se forma en un proceso único y continuo que da como resultado un material con una estructura celular uniforme; generalmente este material es coloreado (Horvath, 1999).

El EPS es fabricado en grandes bloques de diferentes tamaños, pero frecuentemente son de 2 m por 0.75 m por 0.75 m. Su estructura consta de numerosos tubos de composición abierta. La geometría de un tubo individual tiene una forma simple geométrica (círculo, hexágono, octágono, etc). La sección transversal global del conjunto de tubos empaquetados asemeja a un panal de abeja (<http://avisos-espanol.es/geofom>).

1.2. Proceso de manufacturación

El poliestireno expandido tiene inicialmente una consistencia semiviscosa; se deriva de un material conocido como estireno. El poliestireno es un plástico muy resistente que tiene inicialmente forma de esferas. Para preparar el poliestireno expandido, las esferas son expandidas -en espuma- por medio de

calor (usualmente vapor). Este proceso –polimerización- llena el poliestireno con millones de bolsas de aire lo que ayuda a expandirlo y a que sea un material de baja conductividad térmica. Durante la expansión puede ser moldeado en diferentes formas. El producto final es 90% aire, pero sorprendentemente su resistencia puede ser hasta 60 psi (414 kPa) o más (<http://univfoam.com/learning-center/eps-process>).

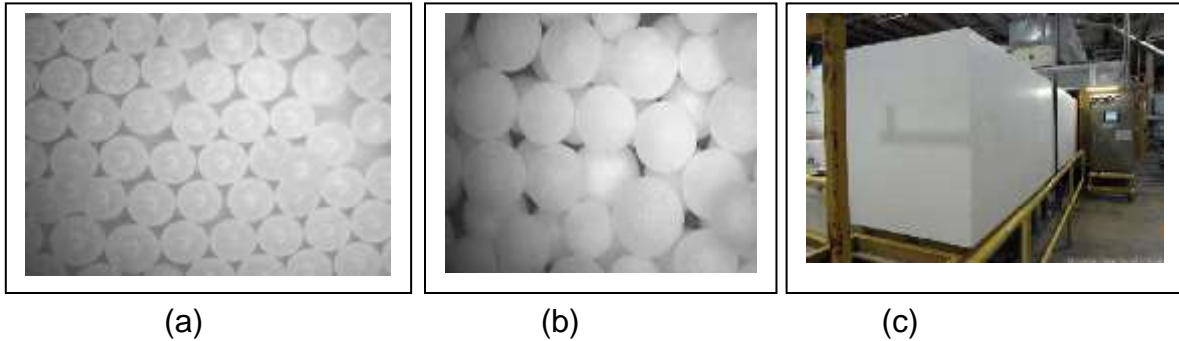


Figura 1.1. Proceso de manufacturación del poliestireno expandido. (a) Estireno, materia prima (b) Estireno espumado; (c) Bloques de EPS (Lin et al., 2010; Stark, Barlett y Arellano, 2012)

Awol (2012), en su tesis titulada “A parametric study of creep on EPS geofam embankments”, muestra la macroestructura del EPS. En esta imagen se observa la gran cantidad de aire en comparación con la parte sólida (Figura 1.2).

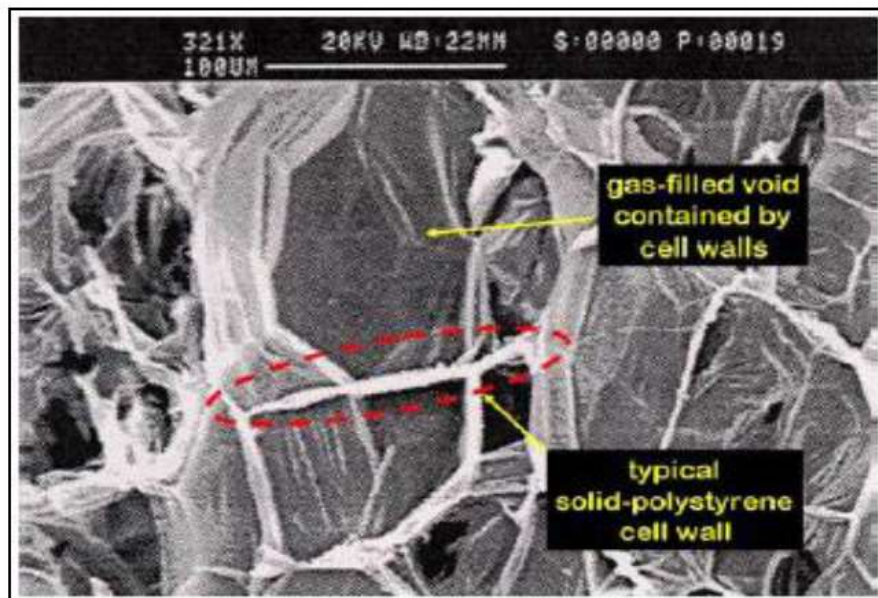


Figura 1.2. Estructura del material EPS

1.3. Primer uso del poliestireno expandido

Cuando en el laboratorio de investigación de carreteras de Noruega empezaron a usar los bloques EPS, no buscaban materiales para aligerar rellenos, sino que tenían un proyecto llamado “Acción de las heladas en los suelos” (1969-1976). En el proyecto participaban varias instituciones para establecer las bases de este campo. Por ese tiempo iniciaba el uso de los paneles de plástico tipo espuma, para proteger los caminos de las heladas. Rápidamente encontraron que la humedad que guardaba el EPS daba como resultado rápidos e inaceptables decrementos en las propiedades aislantes. Las propiedades de humedad podían mejorar si colocaban una membrana impermeable sobre el EPS, y las propiedades de resistencia eran adecuadas para que el material fuera la base de una estructura de pavimento de 50 a 70 cm (Alfheim et al, 2011).

Al mismo tiempo que se realizaba este proyecto, la sección de geotecnia del laboratorio estudiaba diferentes materiales para resolver problemas de estabilidad y asentamientos de rellenos sobre suelos blandos. Entonces pensaron que si el EPS sobrevivía debajo del pavimento, por qué no habría de ser así en un espesor de 1, 5 o 10 m. Entonces lo propusieron a la autoridad de caminos y fue aplicado en un proyecto. Eligieron la carretera nacional 159 en el puente Flom (a las afueras de Oslo) ya que tenía problemas de asentamientos y tenían que renivelarla frecuentemente (Figura 1.3).



Figura 1.3. El sitio: Puente Flom

El perfil del suelo de la zona estaba formado por 3 m de turba, y bajo ésta había 10 m de arcilla limosa blanda.

Del 14 de septiembre al 2 de octubre de 1972 se llevó a cabo la construcción teniendo como diseño final dos capas de EPS (50 cm por capa) cubiertos por una capa de 10 cm poliuretano (Figura 1.4). Utilizaron un material con calidad de 100 kPa, lo cual más tarde sería el estándar.



Figura 1.4. Primera capa de los bloques EPS geofoam
(foto de la referencia: <http://www.betong.net/ikbViewer/Content/823050/02-Refsdal-The%20First%20Geoblock%20Fill.pdf>)

Lo que observaron después de la construcción, fue que hasta 1979 se tenía un asentamiento de 8 cm; de 1979 a 1982 no observaron asentamientos (Alfheim et al, 2011).

Alfheim et al (2011) también indicaron cómo se presentó el uso de bloques de EPS . En la Figura 1.5 se observa que en los primeros años su uso no creció tan rápidamente como lo hizo entre 1983 y 1985.

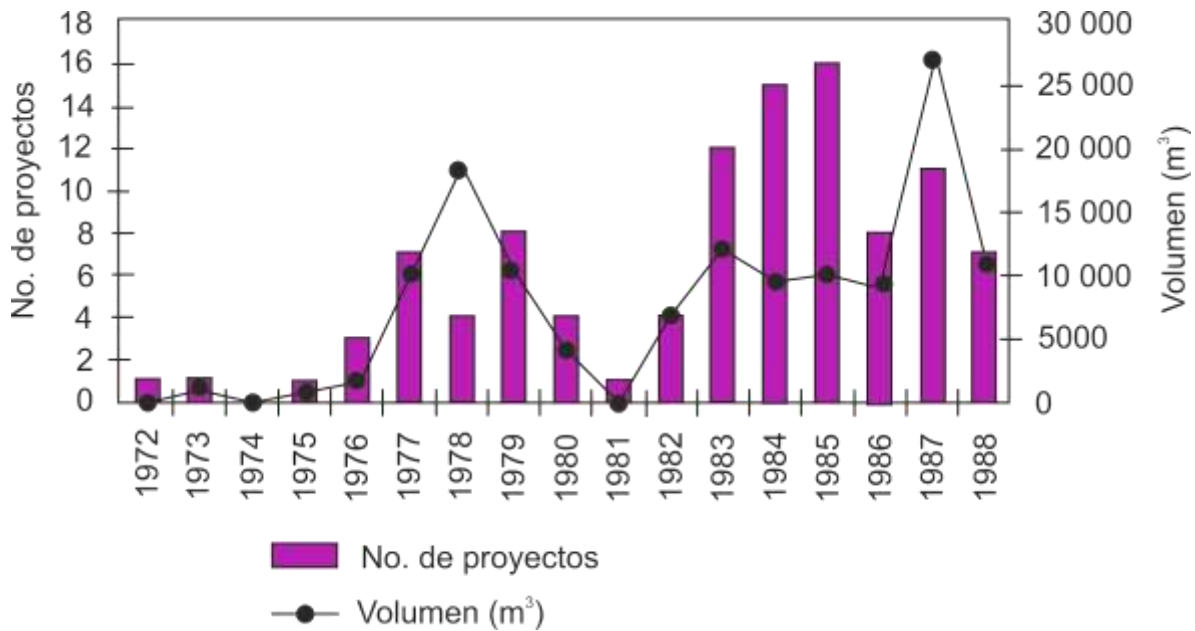


Figura 1.5. Uso de bloques de EPS en Noruega de 1972 a 1988.

A partir de su uso en Noruega, en Europa su utilización fue rutinario en la construcción de rellenos localizados en suelos compresibles (Research Results Digest 380, 2013). En Japón, por ejemplo, es utilizado debajo de las pistas de aterrizaje en aeropuertos, lo que demuestra su capacidad de soporte (<http://avisos-espanol.es/geofoam>). En los Estados Unidos fue empleado por primera vez en 1989 en la autopista 160 entre Durango y Mancos, Colorado. El proyecto más grande de Estados Unidos en donde fue usado el EPS fue en la Interestatal 15 en Utah.

Desde 1985, Japón ha utilizado varios millones de metros cúbicos de EPS; el 67% ha sido colocado en rellenos y 5% en muros de retención (Japan Civil Engineering Construction Methods Development Institute 1996; Sato 2000, citados por Lin et al 2010).

1.4. Funciones del EPS

Horvath (1999) enumera las siguientes funciones del EPS:

Aislamiento térmico: Debido a la gran cantidad de aire (98 % aproximadamente) es un aislante.

Relleno de peso ligero: El material EPS en particular puede tener una densidad tan baja como 10 kg/m^3 , que es menos que un 1 % de los suelos y rocas. A pesar de su baja densidad; el material tiene una rigidez tal que soporta vehículos, trenes, aviones y construcciones ligeras.

Transmisor de fluidos: Puede ser altamente permeable (muchos EPS no lo son) si el producto final se forma o se corta de tal manera que contenga vacíos o canales para que fluyan los líquidos.

Amortigua vibraciones: La alta relación de rigidez con respecto a densidad hace que el EPS amortigüe vibraciones de pequeña amplitud y ruido producido por los motores de vehículos o ruido del tren.

Inclusión compresible: El EPS puede ser colocado detrás o sobre estructuras muy rígidas. El material controla el movimiento de suelo o roca, lo cual reduce a su vez la carga sobre la estructura.

1.5. Ventajas y desventajas del EPS

Algunas de las ventajas y desventajas que tiene el poliestireno expandido son (Duskov, 2000):

- Bajo peso volumétrico

- Módulo dinámico bajo
- Se distribuye en bloques por lo que es de fácil manejo
- En carreteras se instala al menos a una profundidad de 0.5 m, de tal forma que no sea afectado por bichos.
- Por la gran cantidad de aire que tiene, es un material aislante.
- Es resistente a los efectos del ambiente.
- No es resistente al petróleo u otros productos químicos derivados de éste.
- No produce lixiviación.
- Puede ser completamente reciclable.

1.6. Propiedades físicas y mecánicas del EPS

Las propiedades estudiadas de un material deben estar relacionadas con las condiciones reales de trabajo. En un pavimento, si se utiliza EPS, éste estará sujeto a cargas estáticas provocadas por el peso del material de capas superiores, y además a cargas dinámicas provocadas por el tránsito; por lo tanto, las propiedades de interés deben obtenerse bajo esas condiciones. A continuación se enumeran las propiedades del EPS ya estudiadas y presentadas en la literatura.

Densidad

Una de las principales propiedades del EPS que lo hace atrayente como relleno ligero es su baja densidad, la cual se encuentra entre 12 kg/m^3 y 48 kg/m^3 (ASTM D578-14a) (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Valores de densidad del EPS

Clasificación	Tipo													
	XI	I	VIII	II	IX	XIV	XV	XII	X	XIII	IV	VI	VII	V
Densidad, min, (kg/m^3)	12	15	18	22	29	38	48	19	21	26	23	29	35	48

Las designaciones y densidades del EPS para Japón y el Reino Unido aparecen en las Tablas 1.2 y 1.3.

Tabla 1.2. Tipos de EPS en Japón (Miki, 1996., citado por Elragi, 2006)

Tipo	D-12	D-16	D-20	D-25	D-30
Densidad (kg/m^3)	12	16	20	25	30

Tabla 1.3. Tipos de EPS en el Reino Unido (Sanders, 1996., citado por Elragi, 2006)

Tipo	Carga estándar (SD)	Carga pesada (HD)	Carga muy pesada (EHD)	Carga extrapesada (UHD)
Densidad (kg/m ³)	12	16	20	25

Absorción

El manual japonés de diseño del EPS recomienda que el peso muerto de los bloques que sean localizados por arriba del nivel de aguas freáticas (NAF) esté basado en la densidad seca del bloque, y los bloques en la vecindad del NAF estén basado en una densidad de 50 a 70 kg/m³, para tomar en cuenta la absorción de agua (Public Works Research Institute, 1992; citado por Arellano et al., 2011). Estas recomendaciones están basadas en pruebas de laboratorio llevadas a cabo en bloques con una densidad de 20 kg/m³. Sin embargo, en Noruega han extraído bloques de EPS que han estado en las obras durante más de 20 años, y han encontrado contenidos de agua (con base en el volumen) de 10 % para bloques que estaban permanentemente sumergidos, 4% para bloques periódicamente sumergidos y 1% para bloques localizados por arriba del nivel freático (Frydenlund y Aabøe, 2001, citado por Arellano et al., 2011). Frydenlund y Aabøe (2001) (citados por Arellano et al., 2011) recomiendan usar la carga muerta del bloque, basado en una densidad de 100 kg/m³ para una condición sumergida o parcialmente sumergida y 50 kg/m³ para bloques localizados por encima del nivel freático.

La norma ASTM D 578-14^a indica que la absorción de los bloques no debe superar lo especificado en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Valores de absorción de los diferentes tipos de EPS

Clasificación	Tipo													
	XI	I	VIII	II	IX	XIV	XV	XII	X	XIII	IV	VI	VII	V
Absorción por inmersión total, max, volumen en %	4.0	4.0	3.0	2.0	2.0	2.0	0.3	0.3	1.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

Las especificaciones alemanas también muestran los valores de absorción (Tabla 1.5). Elragi (2006) indicó que uno de los factores que más influye en la resistencia a la humedad es la fusión. Van Dorp (1988) (citado por Elragi, 2006) obtuvo que para bloques EPS que han estado en obras en servicio (material por debajo del nivel freático) de 9 a 12 años, mostraron valores de contenido de agua entre 8 y 9%.

Tabla 1.5. Valores de absorción de agua en volumen (Especificaciones alemanas, de van Dorp, 1988; citado por Elragi, 2006)

Densidad (kg/m ³)	Después de 7 días	Después de un año
15	3.0	5.0
20	2.3	4.0
25	2.2	3.8
30	2.0	3.5
35	1.9	3.3

Comportamiento esfuerzo-deformación

En las aplicaciones geotécnicas, el comportamiento bajo carga estática es muy importante. La Figura 1.6 muestra un ensaye con EPS (cuya densidad fue $\rho = 21 \text{ kg/m}^3$) en donde se aplicó una carga a una velocidad de 10%/min. Lo primero que se observó fue que en ningún momento la muestra falló por completo, como generalmente sucede para suelos o rocas. Lo que no es obvio de la figura es que la relación de Poisson es cero o negativa (lo que quiere decir que se deforma horizontalmente y queda como cuello de botella). También se observó que deformaciones mayores al 1% estaban fuera del rango elástico; sin embargo, las deformaciones permanentes fueron significativas hasta niveles de deformación mayores de 10%. A partir de ahí se pudo observar la zona de fluencia típica, caracterizada por grandes deformaciones para pequeños incrementos de esfuerzo. Esto hizo que la zona entre 5 y 10% de deformación fuera denominada la zona de trabajo del material (Brun, 2001). De acuerdo con Horvath (2010), este rango de trabajo es arbitrario, puesto que esa zona no presenta una característica especial sólo que a partir de ella el material empieza a ceder.

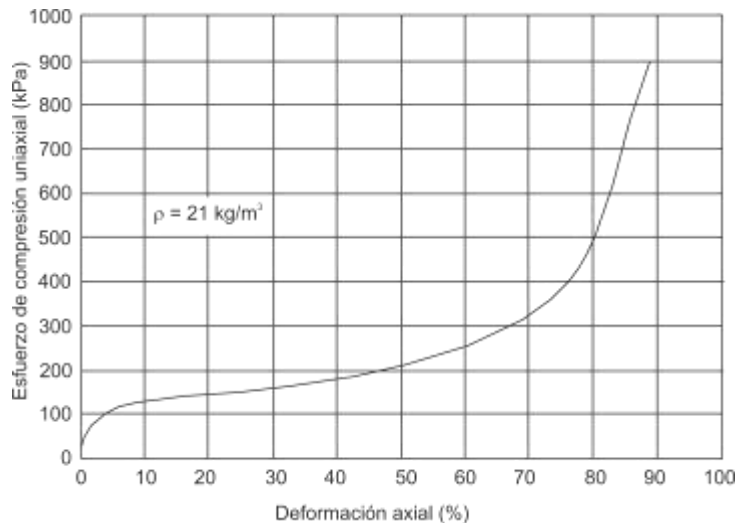


Figura 1.6. Curva esfuerzo-deformación bajo carga rápida para EPS con $\rho = 21 \text{ kg/m}^3$ (Horvath, 2010)

Las curvas deformación-carga (o deformación-esfuerzo) muestran que el esfuerzo se incrementa linealmente hasta alcanzar el límite de elasticidad (1.5 a 2.0% de deformación), lo cual depende de la densidad del material. Cuando se presenta deformación permanente, el valor de la deformación se incrementa rápidamente (Figura 1.7).

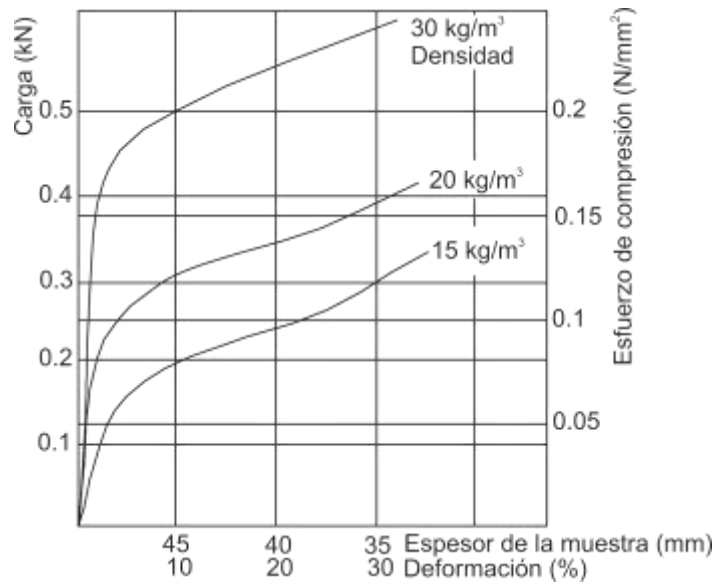


Figura 1.7. Curvas esfuerzo-deformación de tres materiales con diferente densidad

Relación de Poisson

La Tabla 1.6 indica los valores de relación de Poisson publicados por algunos autores. El consenso entre los diseñadores de EPS es utilizar un valor de 0.1.

Tabla 1.6. Valores de la relación de Poisson (Awol, 2012)

	Referencia						
	Yamanaka, et al., 1991	Negussey y Sun, 1996	GeoTech, 1999a	Duskov et al., 1998	Ooe, et al, 1996	Sanders, 1996	Momoi y Kokusyo, 1996
Relación de Poisson	0.075	0.09 y 0.33	0.05	0.1	0.08	0.05 hasta 0.2	0.49

Comportamiento esfuerzo-deformación bajo carga cíclica

El comportamiento esfuerzo-deformación bajo carga cíclica es especialmente importante cuando la estructura involucrada son los pavimentos, puesto que la sollicitación en este tipo de estructuras es el tránsito que aplica cargas dinámicas.

Existen evidencias de que si los esfuerzos aplicados al EPS están dentro del rango elástico, el comportamiento en carga cíclica se mantiene también dentro del mismo rango; no evidenciándose deformaciones por fatiga. Por ejemplo, una muestra cuya densidad era de 20 kg/m^3 fue sometida a cargas cíclicas a una frecuencia de 10 Hz. Se observó que después de 2000 ciclos no hubo degradación del módulo de Young, esto siempre y cuando la deformación se mantuviera menor a 1%. Por otro lado, Flaate (1987) –citado por Awol, 2012– reportó que las pruebas de carga cíclica indican que el EPS soporta un número ilimitado de ciclos de carga, siempre y cuando el nivel de carga se mantenga por debajo del 80% de la resistencia a compresión.

Comportamiento a fluencia (creep)

El comportamiento en fluencia de un material se refiere a un proceso de deformación dependiente del tiempo (Nielsen, 1974; Findley, 1960, citados por Awol, 2012). Cuando el EPS es sometido a una carga permanente durante mucho tiempo, éste acumula deformación permanente cuando la estructura celular empieza a deformarse plásticamente. Este mecanismo hace que la resistencia a compresión se reduzca y gradualmente conduce a un rápido incremento en la deformación permanente (Awol, 2012).

El EPS es diseñado con criterio de deformación (rigidez) y no de esfuerzo. Es común dividir los problemas en baja y alta deformación. Por ejemplo, el uso de material como relleno ligero es un problema de bajas deformaciones. La Figura 1.8 muestra el comportamiento del material en el rango de bajas deformaciones.

La práctica indica que el diseño en el rango de deformación baja requiere limitar las deformaciones por compresión, en cualquier lugar del EPS (ensamble) a no más del 1%. Las razones son que más allá de este valor habrá deformaciones permanentes; las deformaciones mayores a 1% se incrementan con el tiempo, debido al fenómeno de creep, y las deformaciones por debajo de 1% se encuentran en el rango elástico; por lo tanto no se presentan desplazamientos permanentes (Horvath, 2010).

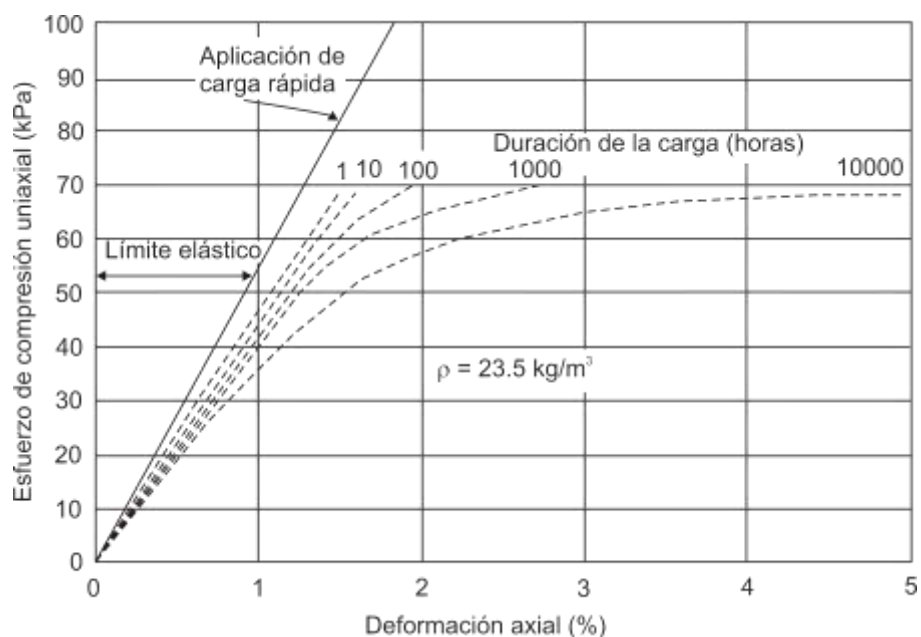


Figura 1.8. Comportamiento esfuerzo-deformación en pruebas de creep

Para estudiar el comportamiento de creep, han sido utilizados especímenes de diferentes formas y tamaños. Cabe señalar que para estas pruebas no existe una norma, lo cual ha constituido un problema en la consistencia de los resultados.

La mayor parte de los resultados reportados en la literatura se han desarrollado en muestras cúbicas de 5 cm (Horvath, 1998). Duškov (1997) usó muestras cúbicas de 5 cm; pero también utilizó muestras cilíndricas de 20 y 15 cm de diámetro, con alturas de 10 y 30 cm. Con respecto a los resultados, Sheely (2000) –citado por Awol, 2012- midió un valor de creep de 1.35% en un periodo de 500 días para cubos de 5 cm; sin embargo, el 68 % de la deformación se presentó en el primer día. Por su parte, Duškov (1997) encontró 0.3 % y 0.15% de deformación inmediata con respecto al 0.5% y 0.25% de la deformación total medida en muestras cilíndricas, respectivamente (Awol, 2012).

La deformación por creep es altamente dependiente de la cantidad de carga aplicada. Si la carga es menor al 25% de la resistencia a compresión; el creep será casi despreciable. La Figura 1.9 muestra los resultados de pruebas de creep llevados a cabo en cubos de 5 cm que fueron sujetos a un esfuerzo durante 500 días. El material utilizado fue el EPS50 con una densidad de 18 kg/m^3 . Es posible observar cómo para un esfuerzo del 50% de la resistencia a compresión, la deformación es aproximadamente 1%.

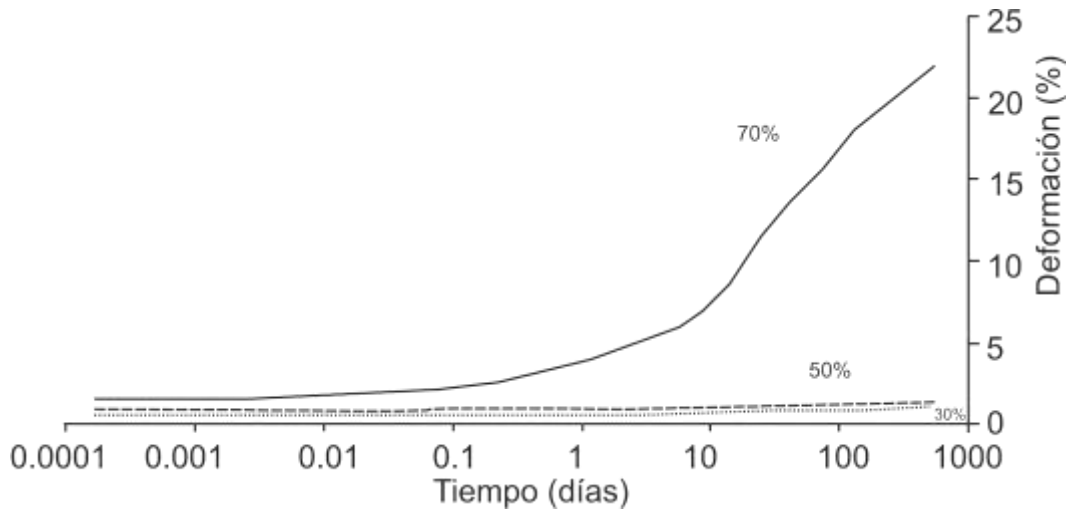


Figura 1.9. Comportamiento de pruebas de creep a diferentes niveles de esfuerzo (Sheeley, 2000)

Resistencia al esfuerzo cortante

Padade y Mandal (2012) determinaron los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de muestras de EPS de 7.5 cm de diámetro por 15 cm de altura. Las densidades estudiadas fueron: 15, 20, 22 y 30 kg/m³. Las pruebas tipo UU se llevaron a cabo a una velocidad de 1.2 mm/min y se terminaron a una deformación axial de 15%. Los resultados de los autores indicaron que en la curva esfuerzo-deformación, la parte lineal de la curva aparecía hasta un 2% de deformación; sin embargo, lo que se observa de estas curvas es que el confinamiento tiene muy poco efecto en este tipo de material (Figura 1.10).

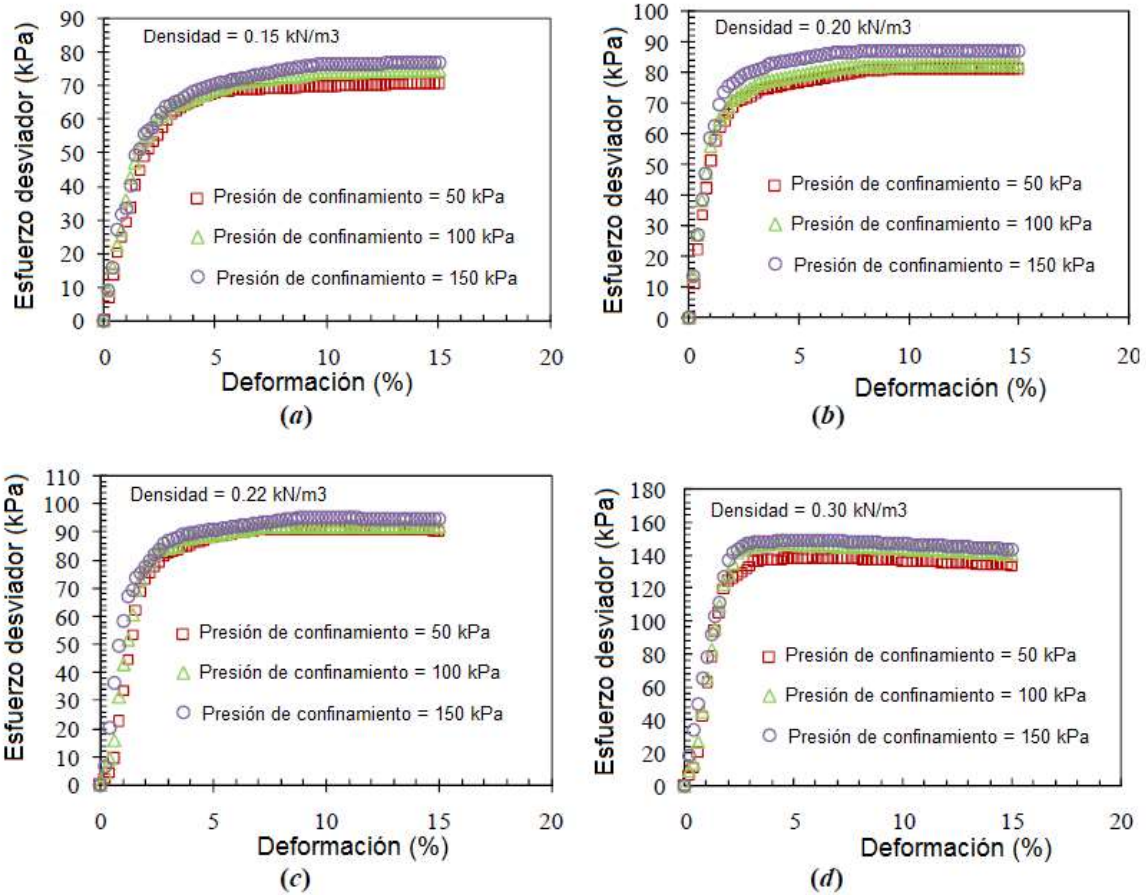


Figura 1.10. Curvas esfuerzo-deformación del EPS. (a) 15 kg/m³; (b) 20 kg/m³; (c) 22 kg/m³ y (d) 30 kg/m³

De acuerdo con los diagramas de Mohr, la cohesión se incrementa a medida que la densidad del EPS aumenta; el ángulo de fricción no experimenta mayor cambio si la densidad del EPS se incrementa (Tabla 1.7 y Figura 1.11).

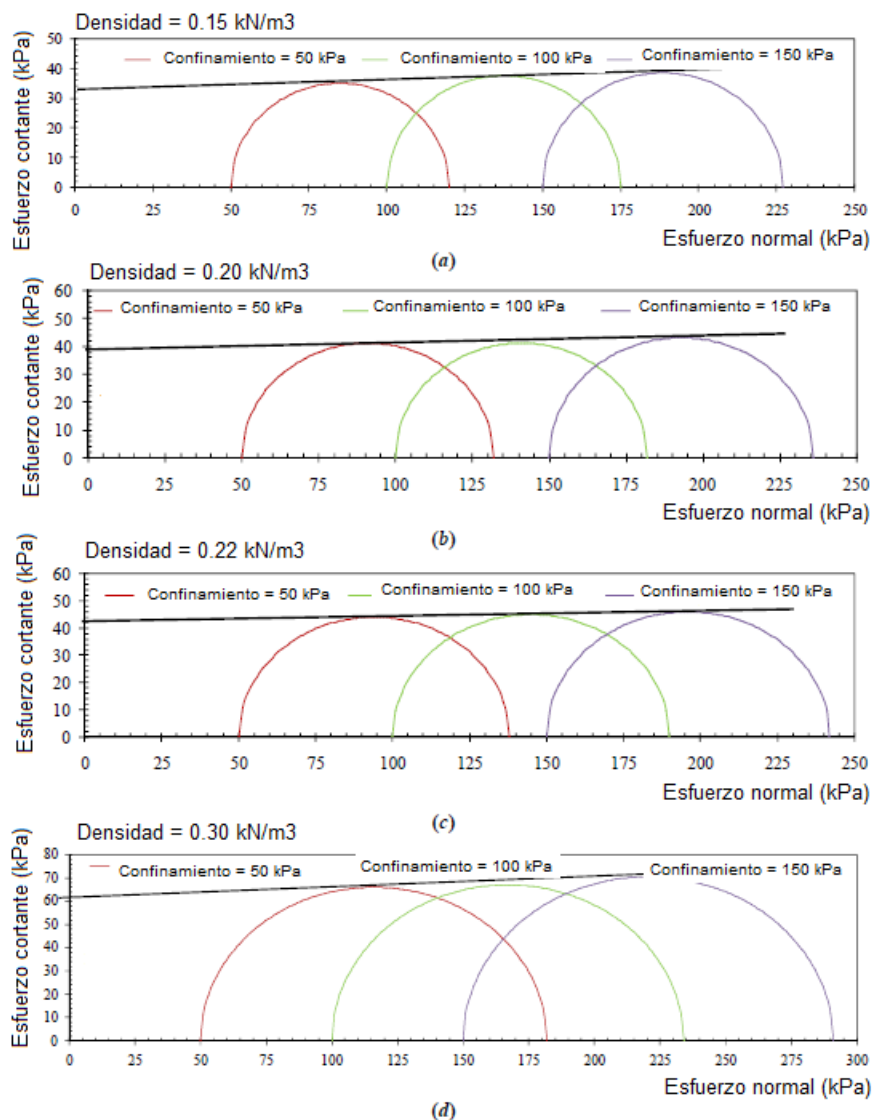


Figura 1.11. Círculos de Mohr del EPS. (a) 15 kg/m³; (b) 20 kg/m³; (c) 22 kg/m³ y (d) 30 kg/m³

Tabla 1.7. c y ϕ para el EPS

Densidad del EPS (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción interna (grados)
0.15	33.75	1.5
0.20	38.75	2
0.22	41.88	2
0.30	62.00	2.5

1.7. Factores que afectan la determinación de las propiedades del EPS

Resistencia a compresión

Las propiedades del EPS dependen en gran medida de los procedimientos utilizados en el laboratorio. Para demostrar esto, Awol (2012) llevó a cabo pruebas de resistencia a compresión en especímenes (extraídos de un bloque de material EPS100 con 30 kg/m^3 de densidad) con forma de cubo, cilindro y disco; y tres tamaños para los cubos (50 mm, 100 mm y 150 mm). La prueba se llevó a cabo con deformación controlada (5 mm/min). La Figura 1.12 muestra los resultados de dicho estudio. Al parecer, las muestras cilíndricas y las tipo disco proporcionan valores mayores de rigidez (Figura 1.12b y c); por otro lado, si a la muestra le reducen su tamaño, la rigidez se subestima.

También se estudió el efecto de la temperatura, pero los resultados fueron inconsistentes; por lo que no se pudo concluir cuál era el efecto (Figura 1.12d).

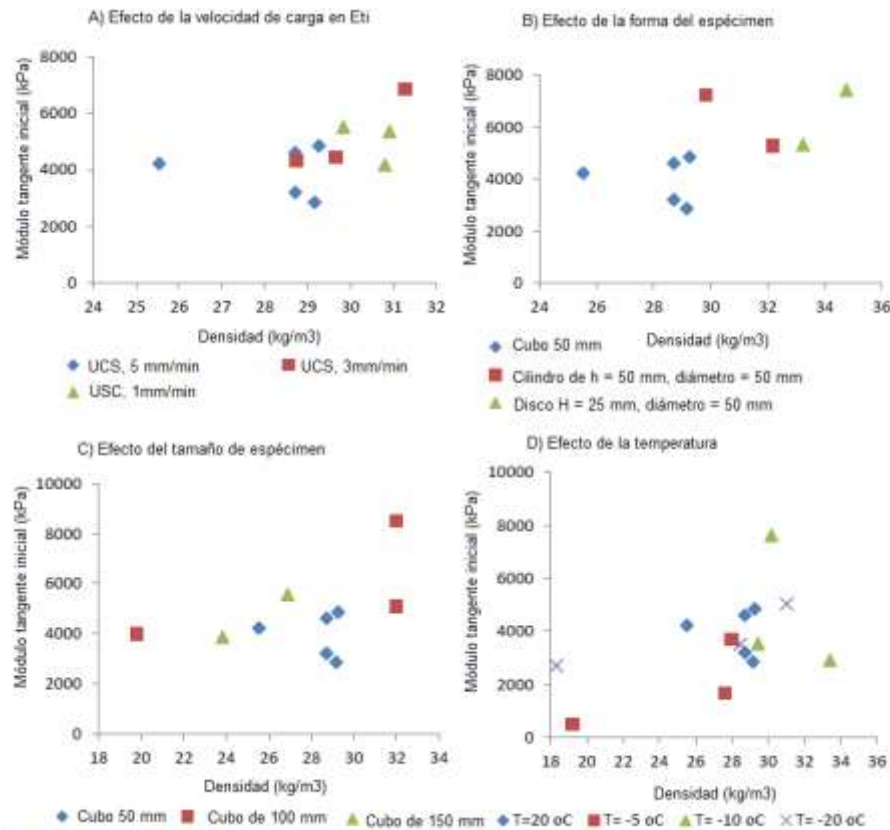


Figura 1.12. Efecto de la velocidad de carga, tamaño del espécimen y temperatura en el módulo tangente inicial

La figura anterior muestra el efecto en el módulo tangente inicial. De igual manera, la resistencia a compresión también se ve afectada por las mismas variables mencionadas arriba; como lo muestra la Figura 1.13.

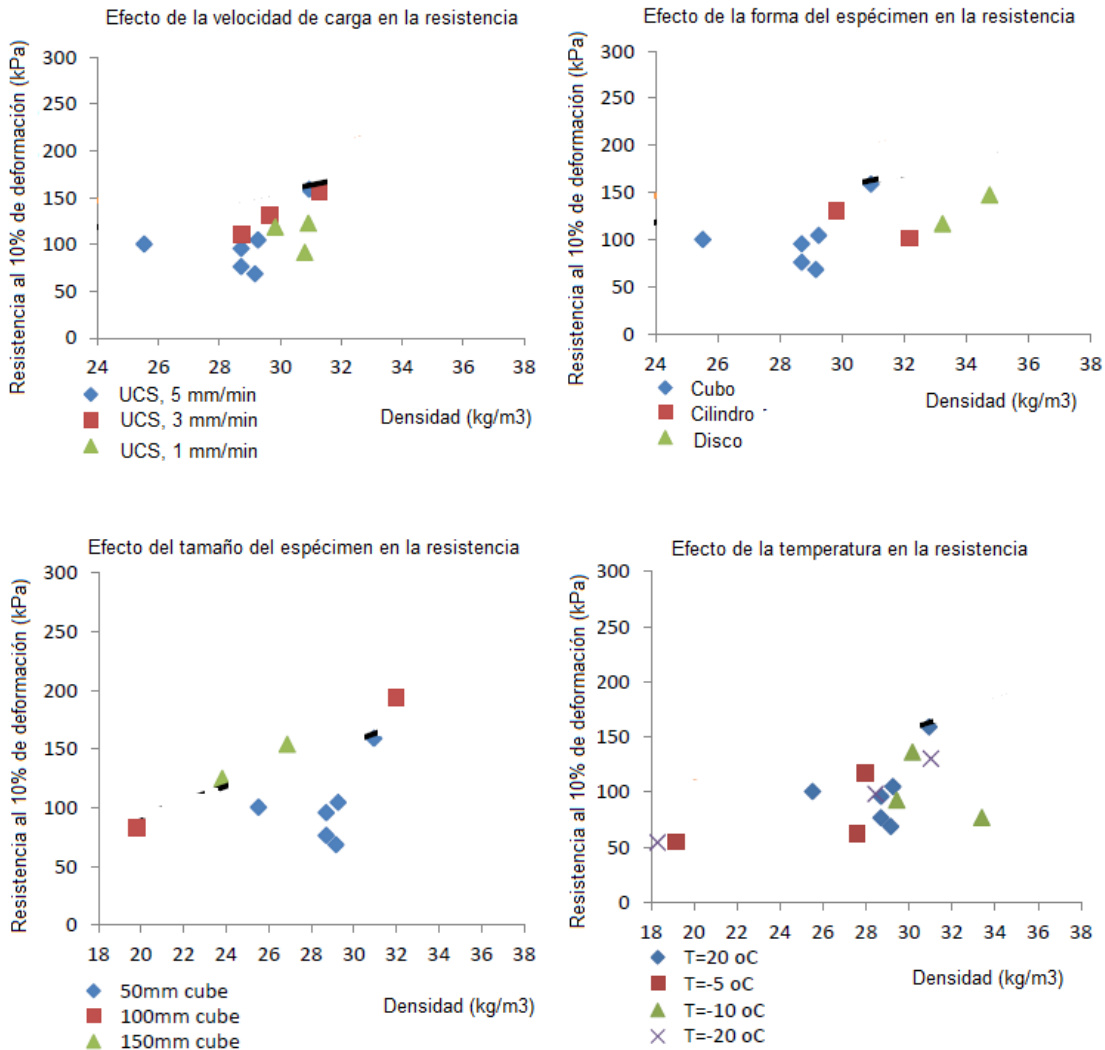


Figura 1.13. Efecto de la velocidad de carga, forma del espécimen y temperatura en la resistencia a compresión

De la Figura 1.13, Awol (2012) dedujo que la resistencia se incrementó al reducir la velocidad; sin embargo, menciona que tampoco fue un resultado concluyente. Con respecto a la forma del espécimen (Figura 1.13b y c), Awol concluyó que la resistencia fue de 100, 116 y 132 kPa para especímenes cúbicos, cilindro y disco, respectivamente. El tamaño del espécimen también juega un papel clave en la resistencia, ya que se obtuvo un incremento de un 30% en la resistencia, si el tamaño del espécimen varía de 50 a 100 mm. Con respecto a la variación en temperatura; al reducirla, la resistencia a compresión se incrementó. Con un espécimen a -5°C se obtuvo 89 kPa y se incrementó a 114 kPa para una temperatura de -20°C .

Creep

Efecto del tamaño de muestra

Awol (2012) realizó pruebas de creep en cubos -EPS con densidad de 30 kg/m^3 de 5, 10, y 15 cm (Figura 1.14) a temperaturas de -20, -10, -5 y 20°C . También utilizó muestras cilíndricas y en forma de disco, para poder realizar una comparativa.



Figura 1.14 Geometrías de los especímenes

Las pruebas fueron realizadas colocando sobre las muestra un peso muerto que aplicó un esfuerzo de 30 kPa. Este esfuerzo se mantuvo durante 5 días. Los resultados de Awol indicaron que cerca del 1% de deformación total se registra dentro de los primeros 5 días para muestras cúbicas de 5 cm. Si la muestra tiene un tamaño de 10 o 15 cm de lado, la deformación es de 0.85 y 0.55 %, respectivamente; esto indica que a mayor tamaño de muestra, la deformación se reduce, además, más del 97% de la deformación se presenta de forma inmediata (Figura 1.15).

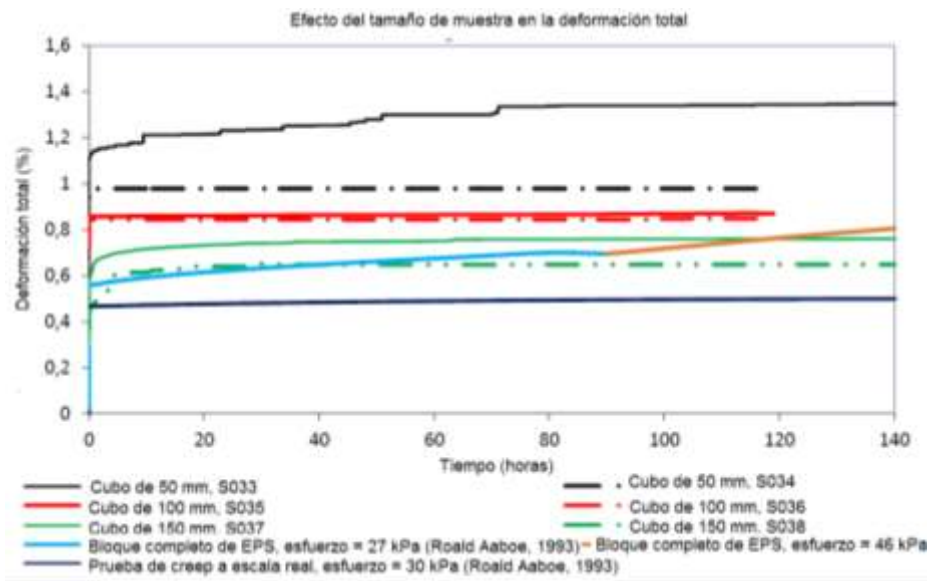


Figura 1.15. Efecto del tamaño del espécimen en la deformación total medida en cubos de EPS

Efecto de la forma de la muestra

La forma de la muestra también afecta la deformación obtenida. Awol (2012) también estudió esta variable. Él obtuvo que la deformación es similar en el cubo, disco, o cilindro; sin embargo, la muestra con forma de disco muestra la menor cantidad de deformación inmediata pero la velocidad con la que se deforma el espécimen es mayor. Por lo cual, en un periodo de tiempo largo puede presentarse una mayor deformación (Figura 1.16).

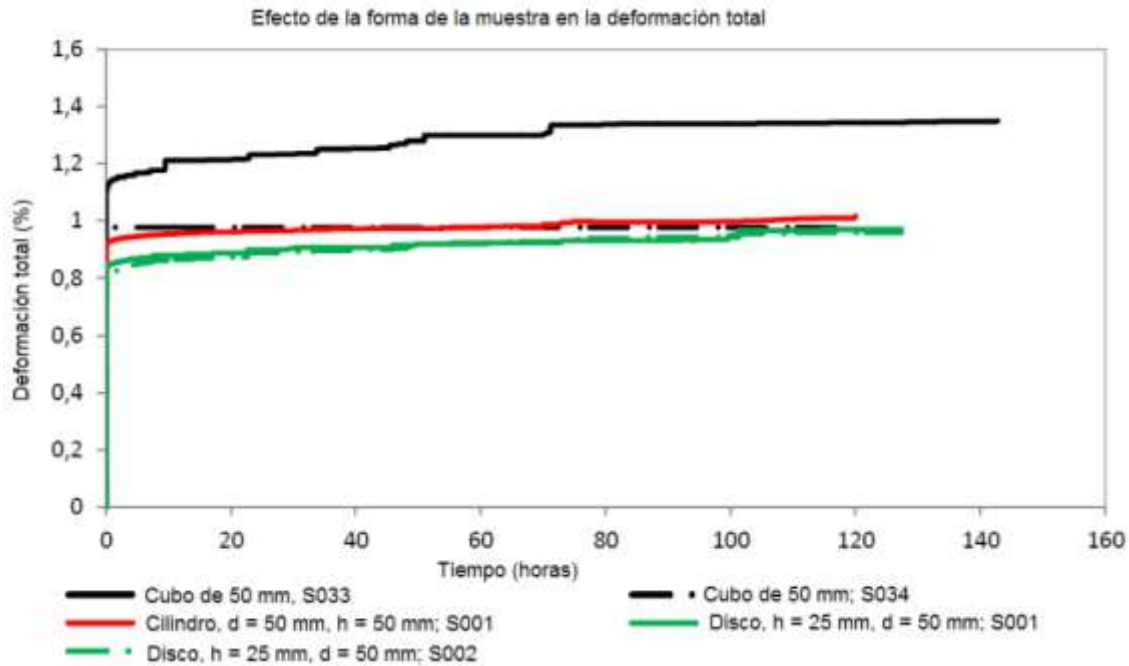


Figura 1.16. Efecto del tamaño de muestra en la deformación total del EPS

Efecto de la temperatura

La deformación del EPS se presenta cuando son ajustadas las cadenas moleculares. Si se incrementa la energía térmica, también crece la velocidad de cambio que permite rearrreglos moleculares y por lo tanto deformación. Cuando hay un incremento en la activación de la energía en las moléculas de aire, la velocidad del movimiento será mayor; si la temperatura del aire se incrementa, la posibilidad de que el aire atrapado en las celdas del EPS salga es mayor, por lo que se presentará mayor deformación. Los resultados de deformación obtenidos en muestras ensayadas a diferentes temperaturas parecen indicar resultados contrarios o lo esperado. Las muestras fueron ensayadas a un esfuerzo constante de 30 kPa y a temperaturas de -20, -10 y -5°C. Las deformaciones obtenidas fueron de 0.89 %, 0.76% y 0.67%, respectivamente (Figura 1.18) (Awol, 2012).

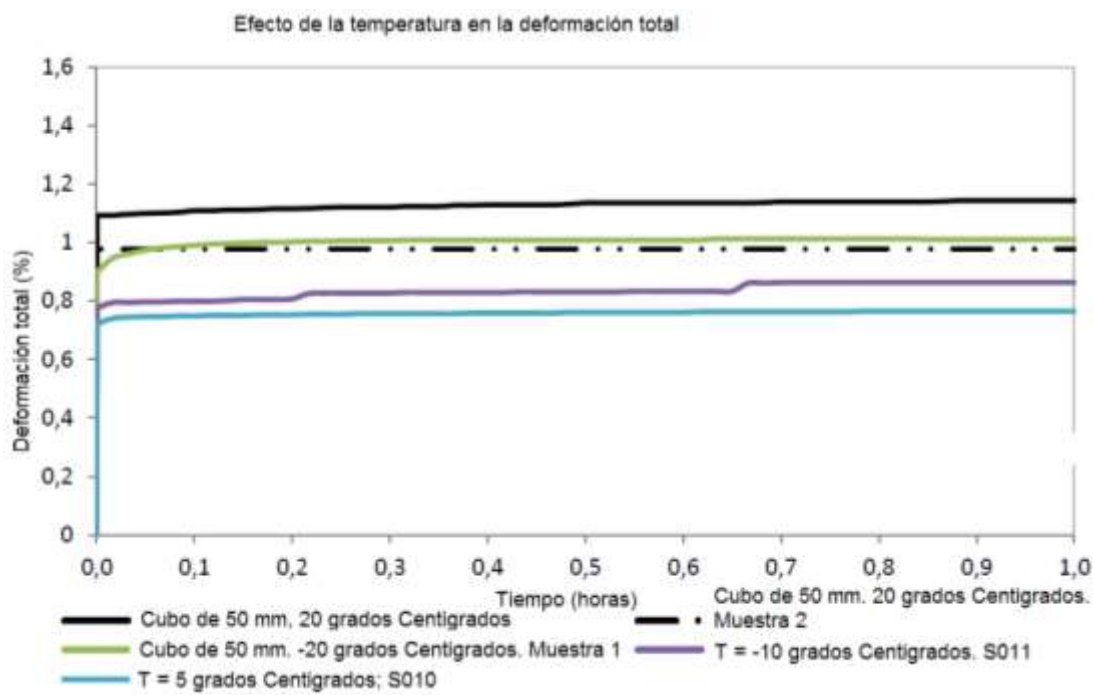


Figura 1.17. Efecto de la temperatura en la deformación total del EPS

1.8. Casos históricos de fallas

Caso 1: Falla prematura de un pavimento debido al movimiento de los bloques

En la construcción, el bloque de EPS es colocado en piezas individuales; sin embargo, el diseño de este material asume que el EPS se comporta como una masa homogénea. Con la experiencia existente hasta 1998, esta suposición era razonable; siempre y cuando se cumpliera con ciertos requisitos. Duskov (1994, 1997a, 1997b citado por Horvath, 1999) publicó sobre un proyecto de reconstrucción de una calle en Rotterdam (The Netterlands). En este proyecto colocaron block EPS en la subrasante para reducir los esfuerzos sobre el suelo compresible. En una porción de la calle, colocaron solo una capa de bloques EPS de 500 mm de espesor, lo restante llevó dos piezas. Después de un mes de la construcción, se abrió al tránsito. Se observaron agrietamientos en la carpeta asfáltica en la sección en donde solo habían colocado una capa de EPS. Después de una investigación, encontraron que los bloques se habían desplazado en las uniones. Los movimientos horizontales (Figura 1.18) y verticales dejaron huecos de 20 mm. La falla se atribuyó al hecho de no asegurar un buen contacto entre los bloques durante la colocación; además, una línea de juntas verticales coincidió con la trayectoria de paso de los vehículos lo que concentró la carga sobre la junta. La falla se agravó más debido al paso de tránsito pesado.



Figura 1.18. Movimiento horizontal que dio como resultado un vacío de aproximadamente 20 mm entre bloques de EPS.

Lo que aprendieron de este caso fue que al menos deben ser colocadas dos capas de EPS. Por otro lado, el ensamble debe ser tal que los bloques trabajen como una masa homogénea para evitar, además, continuidad de juntas verticales. Una buena práctica de colocación aparece en la Figura 1.19.



Figura 1.19. Relleno en la aproximación de un puente (Carretera 7 en el Río Stave, British Columbia, Canadá). El acomodo permite que el material actúe como una masa homogénea.

Caso 2: Flotación de bloques

La baja densidad del material lo hace extremadamente boyante ante líquidos como el nivel freático. Frydenlund y Aabøe (1996) (citado por Horvath, 1999) mostraron dos casos, uno sucedió en Noruega en 1987 y otro en Tailandia. En estos casos, los rellenos de bloques EPS flotaron durante una inundación que ocurrió posterior a la construcción; los pavimentos fallaron y los rellenos tuvieron que ser reconstruidos. Cabe señalar que en Noruega fueron dos rellenos los que

fueron afectados, sin embargo, uno de ellos ya tenía 15 años de haber sido construido.

De esto se desprendió el hecho de que el diseño (cuando se usan bloques de geofoam) debe tomar en cuenta el periodo de retorno de las inundaciones.

Caso 3: Fallas en pavimentos con sistema de aislamiento

El EPS tuvo sus primeros usos en los sistemas de aislamiento para pavimentos en los años sesenta (Figura 1.20), en países del hemisferio norte donde se tienen problemas de congelamiento y deshielo. Posteriormente se extendió su uso a vías del ferrocarril y pistas de aeropuertos.

El objetivo inicial del sistema era que el EPS tuviera espesor suficiente (de 50 a 100 mm) de tal manera que la subrasante no se congelara. Inicialmente era común colocar el EPS cerca de la superficie del pavimento (a profundidades en el orden de 300 mm), con base en un análisis de esfuerzos.

Noruega fue uno de los países pioneros en el uso de este tipo de pavimentos; sin embargo, Refsdal (1987) (citado por Horvath, 1999) indicó que el uso de estos pavimentos no alcanzaba la popularidad prevista inicialmente, ya que un tercio de los pavimentos con este sistema habían fallado prematuramente. Las fallas fueron atribuidas a factores como: capacidad insuficiente o espesor inadecuado de la base, subdiseño térmico del EPS, baja capacidad de la subrasante, EPS colocado en subrasantes irregulares, sobresforzar el EPS durante la construcción, acotamientos estrechos (soporte lateral insuficiente del EPS), dificultades para compactar el material de base sobre el EPS y aberturas entre paneles de EPS.

Kestler y Berg (1995) citado por (Horvath, 1999) exponen un caso de falla de un pavimento de aeropuerto en Maine, USA. Estos autores mostraron que la falla se debió a varios de los factores ya comentados en el párrafo anterior.

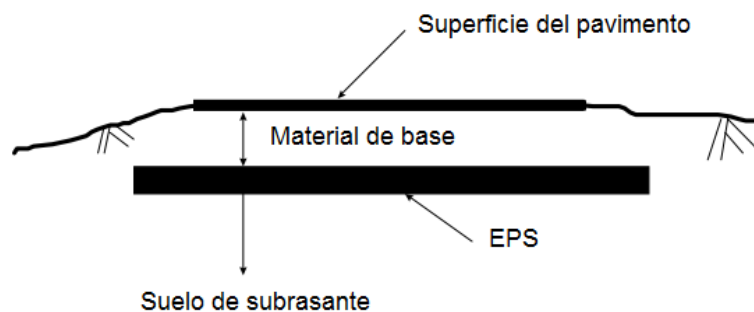


Figura 1.20. Sección esquemática de los componentes de un pavimento con aislamiento

Caso 4: Formación de hielo de una manera diferencial

En este caso, Horvath (1999) menciona un pavimento en donde tenían dos secciones contiguas. En una colocaron EPS y en otra no. En la sección que tenía EPS, se formó escarcha en la superficie; y en la otra no. La explicación a este problema fue la siguiente:

El autor indica que, durante la noche, el suelo radia calor a la atmósfera y un cielo claro maximiza la transmisión. A medida que el calor es transferido, el suelo se enfría por debajo de la temperatura del aire. Si hay suficiente vapor de agua en el aire, éste se condensará en la superficie; si la temperatura de la superficie se reduce por debajo del punto de congelación, el vapor condensado se congelará. A esto se le llama escarcha.

La explicación es que el calor se emite a la atmosfera, pero a medida que esto sucede, éste es reemplazado por más calor de capas inferiores cuando no existe el sistema de aislamiento. En cambio, cuando si hay un sistema aislante, el EPS evita la salida del calor del suelo que se encuentra por debajo de él. Como resultado, el calor por encima se pierde rápidamente y la temperatura del pavimento cae por debajo de la temperatura de la superficie. Si se desarrollan las condiciones adecuadas, surge la escarcha.

De estos casos, llegaron a la conclusión que el EPS debe ser colocado a una profundidad mayor a 50 cm (antes lo colocaban a 30 cm). La base por encima del él debe contener una cierta cantidad de finos para que mantenga una cantidad de agua y, así, conserve una cierta cantidad de calor.

Caso 5. Fallas debidas a sobrefuerzo en el EPS

Horvath (2010) menciona que la mayoría de las fallas recientes parecen ser el resultado de un diseño inapropiado de la estabilidad interna; específicamente, de los esfuerzos verticales impuestos a los bloques de EPS. La aplicación de un esfuerzo mayor al del rango elástico produce compresión excesiva y simultáneamente trae aparejados asentamientos diferenciales. Estas deformaciones se siguen incrementando debido a la fluencia del material con respecto al tiempo. En muchos casos, la compresión y asentamiento han sido tan severos que debieron retirar el EPS y reemplazarlo con material nuevo o reemplazarlo con material de otro tipo.

De acuerdo con Horvath (2010), los diferentes escenarios para que se presenten este tipo de fallas son:

- El ingeniero no diseñó de los bloques EPS, solo especificó la compra de material EPS basado en proyectos precedentes.
- El ingeniero desarrolló lo que el creyó como diseño, pero no supo cómo comparar los esfuerzos calculados con el tipo de EPS.

- El ingeniero hizo un diseño adecuado y especificó el material apropiado, pero no desarrolló especificaciones de construcción y materiales para asegurar que se proveyeron los bloques adecuados (Horvath, 2009 citado por Horvath, 2010).
- Todo lo del punto anterior era adecuado y sí se tenían las especificaciones de control de materiales y construcción; sin embargo, el proveedor del material EPS proporcionó material de mala calidad. El material fue colocado debido a las prisas en la construcción, o a que no habían detectado que el material no cumplía con la calidad.
- Realizaron el proceso adecuado y el material fue el adecuado, pero durante el proceso constructivo permitieron que el equipo de construcción circulara sobre el material sin que éste tuviera una capa de material que lo protegiera.

Caso 6. Fallas debidas a procesos constructivos

Han surgido una serie de fallas en rellenos de EPS durante la construcción; muchas de esta categoría han involucrado movimiento de los bloques debidos a factores como el agua o el aire. Se han presentado lluvias fuertes que mueven los bloques que ya estaban colocados. En otro caso, se combinó la lluvia con fuertes vientos; lo que movió de igual manera los bloques.

Caso 7. FALLA EN LA ALCANTARILLA EN SIDNEY, NUEVA YORK

En junio del 2006, en Sidney, Nueva York, colapsó una alcantarilla debido a una lluvia torrencial que se presentó (Figura 1.21).



Figura 1.21. Colapso de una alcantarilla en la carretera I88, junio 2006 (foto tomada de <http://www.constructionequipmentguide.com/Record-Rainfall-Destroys-Section-of-New-Yorks-I-88/7191/>)

En este caso, se requería de una solución rápida para la reconstrucción de la alcantarilla. Entonces, pensaron en colocar una alcantarilla formada con segmentos de concreto prefabricado; sobre la alcantarilla deberían colocar un relleno que no provocara esfuerzos altos; por lo tanto, eligieron el EPS con una densidad nominal de 20 kg/m^3 . Un bloque (con dimensiones de 0.9 por 1.2 por 2.4 m) por camión era revisado para que cumpliera con la densidad; si no la cumplía, todo el cargamento se rechazaría.

Sobre la alcantarilla colocaron una capa de suelo, y sobre éste, el EPS en dos y tres capas; según la orientación especificada. Por la premura que existía para la construcción, sobre el EPS no se coló la losa de concreto sino que colocaron un geotextil como barrera y sobre éste otra capa de suelo; después, la carpeta asfáltica.

Después de la apertura, observaron asentamientos y agrietamientos transversales. En la estación 2+913 (en dirección oeste) se presentaron asentamientos después de completar el pavimento; inicialmente fueron rápidos y después la velocidad se redujo. En cuatro meses hubo un asentamiento de 45 cm.

De las densidades medidas en bloques nuevos y recuperados, encontraron que la densidad era menor a la especificada en la norma ASTM D6817. Debido a los problemas presentados, decidieron retirar el EPS y el suelo que fue colocado encima. Después de retirar el pavimento, el suelo y el geotextil, observaron que los bloques de EPS se deformaron formando una cuenca (Figura 1.22); además, sobre el geotextil detectaron agua.



Figura 1.22. Boques de EPS después de retirar el pavimento, suelo y geotextil

Después de llevar a cabo más pruebas, encontraron que el esfuerzo al 1% de deformación no cumplía con la norma ASTM D 6817; sin embargo, este criterio no

estaba en las especificaciones del proyecto. Ya que el esfuerzo al 5 y 10% de deformación sí se cumplía.

El estudio destaca que realizaron pruebas de carga en multibloque, con el objetivo de determinar cómo se presentaba la deformación si la densidad de los bloques era diferente o si las justas quedaban conectadas.

La primera prueba consistió en colocar dos capas de geofoam y en cada capa tres bloques de geofoam (6 cubos de 5 cm de lado; la densidad del material fue 20 kg/m^3). En este caso, las juntas quedaron conectadas (Figura 1.23). Una vez que fue aplicada la carga al conjunto, observaron que todas las muestras se deformaron de forma similar y la interfase entre las dos capas permaneció horizontal. Por otro lado, en la segunda prueba, colocaron dos capas de EPS; pero unos cubos tenían densidad de 20 kg/m^3 y otros de 16 kg/m^3 . En este caso, los cubos de EPS de menor densidad se deformaron más, incluso, la interfase entre las dos capas de material no se mantuvo horizontal.

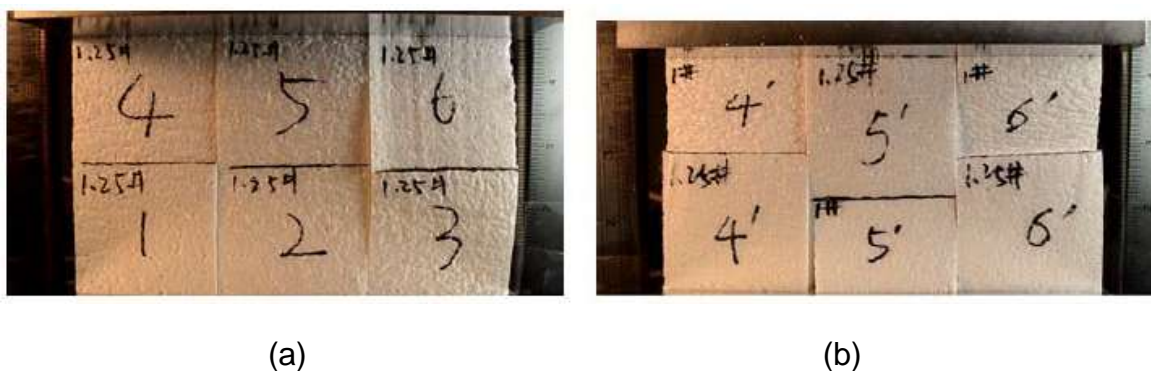


Figura 1.23. Prueba de compresión en bloques de geofoam. (a) Bloques con densidad de 20 kg/m^3 después de la prueba; (b) bloques con densidad de 20 y 16 kg/m^3 después de la prueba de carga (de Negussey et al., 2014).

La tercera prueba consistió en colocar dos capas de EPS (20 kg/m^3 de densidad); pero en este caso, los bloques superiores solo fueron dos, con un ancho de 7.5 cm; por lo tanto, las juntas quedaron escalonadas. Lo que observaron para este caso fue que los bloques se deformaron de forma similar y la interfase entre capas permaneció horizontal. Por otro lado, el experimento también fue con 5 bloques; solo que en este caso se combinaron bloques de densidad de 20 y 16 kg/m^3 . En este caso se observó nuevamente que los bloques de menor densidad se deforman más y que la interfase no se mantiene horizontal (Figura 1.24) (Negussey et al., 2014).



(a)

(b)

Figura 1.24. Pruebas con 5 bloques. (a) Bloques de 20 kg/m^3 ; (b) Bloques de 20 y 16 kg/m^3 (de Negusse et al., 2014).

De lo anterior se destaca que existen ya varios estudios del EPS en donde se muestra que existe aún un campo amplio de investigación, tanto de laboratorio como de campo; por lo tanto, probablemente los resultados obtenidos en esta investigación se sumen a los esfuerzos internacionales y, además, den pauta a los constructores a hacer uso de este material tan novedoso.

2 Especificaciones del EPS

La normativa para un material, producto o proceso tiene un impacto importante en la práctica de la ingeniería, si la norma es emitida por un organismo reconocido. En México, la normativa para construcción de carreteras es la emitida por la Secretaría de Comunicaciones. Para el caso de materiales como “poliestireno expandido” -que está considerado como un tipo de geosintético- la Secretaría no ha emitido, hasta la fecha, ninguna normativa. En esta sección se muestra cómo fue presentada la formulación para las especificaciones del EPS en Estados Unidos.

2.1. Evolución de la normativa para el EPS

En 1965 fue publicada por primera vez la ASTM C 578: Standard Specification for rigid, cellular polystyrene thermal insulation. Esta norma contemplaba materiales como el EPS y XPS, aun cuando son materiales diferentes debido a su procesamiento. En el documento aparecen diferentes tipos (grados) de material EPS o XPS; cada uno con sus propiedades, basadas sólo en densidad.

El material se creó como material aislante para las construcciones; por tanto, las propiedades térmicas eran lo único que interesaba. Las propiedades mecánicas eran de interés secundario ya que solo eran importantes en el corto plazo para determinar la capacidad de traslado, manipulación y colocación; sin dañar el material. La norma sí contempla la resistencia a compresión y a flexión que son propiedades irrelevantes para análisis y diseño de problemas de pequeñas deformaciones (Horvath, 2012).

Inicialmente, fue promovido el uso de la resistencia a compresión y la densidad como las bases para el diseño de rellenos ligeros usando bloques de EPS. Esto se extendió en varios países, incluyendo Estados Unidos. No fue sino veinte años más tarde –alrededor de 1990- cuando Horvath y otros investigadores del Reino Unido, Francia y Alemania, se dieron cuenta que el bloque de EPS se diseñaba mejor por desplazamiento que por resistencia. A partir de esto indicaron que la norma ASTM C578 no era adecuada.

2.1.1. Norma NCHRP 24-11

El grupo de investigación NCHRP 24-11 se dio cuenta de que necesitaban generar un documento de diseño de uso práctico e inmediato para los ingenieros. Este, además, debería estar de acuerdo con el equipo y técnicas de moldeo que tenían para esa fecha. El equipo advirtió que el documento debería de tomar en cuenta consideraciones como:

- La industria producía bloques EPS basados en la norma C578; por lo tanto era necesario manufacturar el material tomando en cuenta la norma, pero sin poner énfasis en la densidad como la propiedad primaria; ya que para los 1990s era un hecho que la densidad sola no era una medida de aceptación para la calidad del EPS.
- El equipo se percató que la nomenclatura con números romanos no debería usarse en la nueva norma.
- Las propiedades del material a bajas deformaciones (esfuerzo en el límite elástico y módulo tangente inicial) se seleccionaron como las propiedades primarias para cada tipo de material. El esfuerzo elástico límite fue definido como el esfuerzo al 1% de deformación y el módulo tangente inicial se definió como la pendiente de la línea entre 0 y 1% de deformación.
- Mantuvieron las propiedades como resistencia a compresión y flexión que no eran usadas directamente en el diseño de problemas que involucraban pequeñas deformaciones.

Al generar la norma, lo primero que acordaron fue la designación. Esta fue “EPSX”, en donde la X correspondería a dos o tres números que indicarían el esfuerzo elástico límite mínimo en kilopascales, para el tipo de material.

Con respecto a las propiedades de módulo tangente inicial y el esfuerzo en el límite elástico que debería incluir la norma, primeramente estudiaron lo publicado; ya que estas propiedades no habían sido incluidas en ninguna norma. Estudiaron dos grupos de resultados que incluían el estado del conocimiento en Estados Unidos y en todo el mundo.

El primer grupo de resultados era el que presentó Horvath (1995). Estos fueron expuestos como módulo tangente inicial en función de la densidad del EPS. Sin embargo, en reportes del proyecto 24-11(02), estos datos fueron graficados en forma de esfuerzo límite elástico en función de la densidad (Figura 2.1). La razón de esto fue que la resistencia a compresión se mide directamente en laboratorio y el módulo se calcula con base en resultados de compresión.

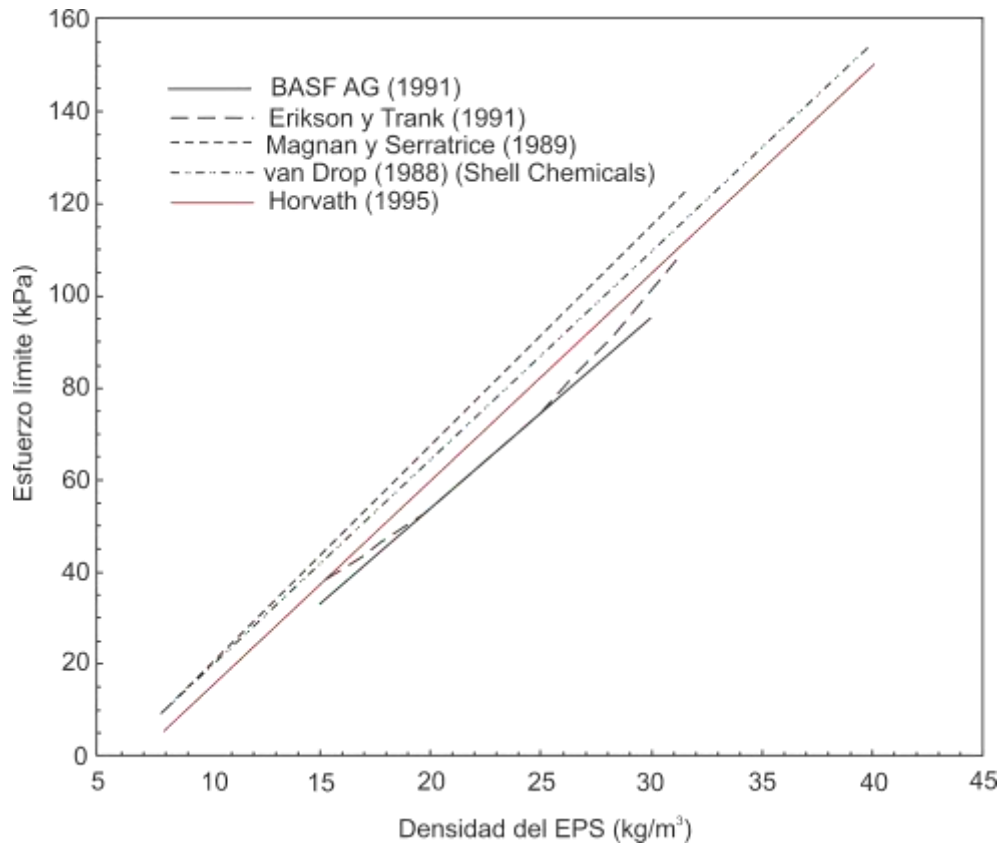


Figura 2.1. Esfuerzo elástico límite contra densidad del EPS (Horvath 1995 y 2001; Arellano et al 2011b; citados por Horvath, 2012)

En esta figura se ve claramente que existe un esfuerzo elástico límite para cada material EPS, pero no sorprende debido a la falta de protocolos de ensayo; por lo que los autores seguramente utilizaron diferente forma de espécimen y velocidad de aplicación de carga; además, se tiene el error por convertir el módulo tangente inicial a esfuerzo elástico límite.

La otra serie de datos fue tomada de la literatura de EPS y había sido usada por AFM Corporation para promover las aplicaciones del producto en los noventa, hasta que la ASTM publicó la norma en el 2002. La relación entre esfuerzo elástico límite (llamado esfuerzo al 1% de deformación) y la densidad del material EPS aparece en la Figura 2.2.

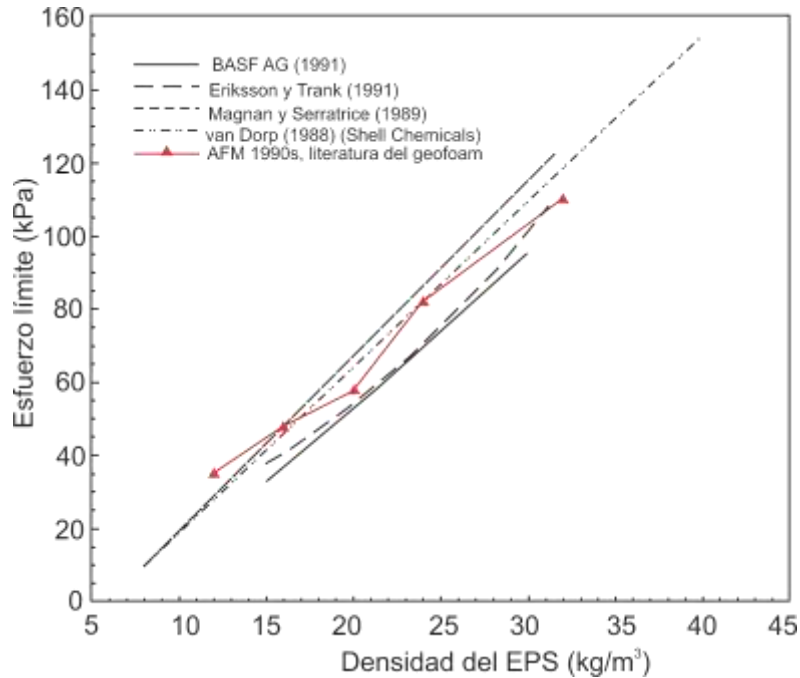


Figura 2.2. Esfuerzo elástico límite contra densidad del EPS para bases de datos usados en el desarrollo de la norma NCHRP 24-11(01) (Horvath 1995 y 2001; Arellano et al 2011b; citados por Horvath, 2012)

Los triángulos son los materiales ofrecidos por AFM Corporation. En la misma figura también colocaron la información de la serie de datos europeos, para poder realizar la comparativa. De esta figura se observa entonces que los datos de AFM caen cerca de los datos europeos, con lo que se puede decir que los datos utilizados por AFM Corporation son consistentes con la experiencia mundial, hasta esa fecha.

Contenido final de la norma NCHRP 24-11

Para la norma solo incluyeron el EPS con densidad de 16, 20, 24 y 32 kg/m³. La Figura 2.3 muestra los valores de esfuerzo elástico límite, en función de las densidades. En la misma figura, nuevamente aparecen los valores de la serie de datos europeos. Nótese que los valores están en la parte más baja de los datos europeos y, además, también son valores más bajos de acuerdo con lo garantizado por AFM.

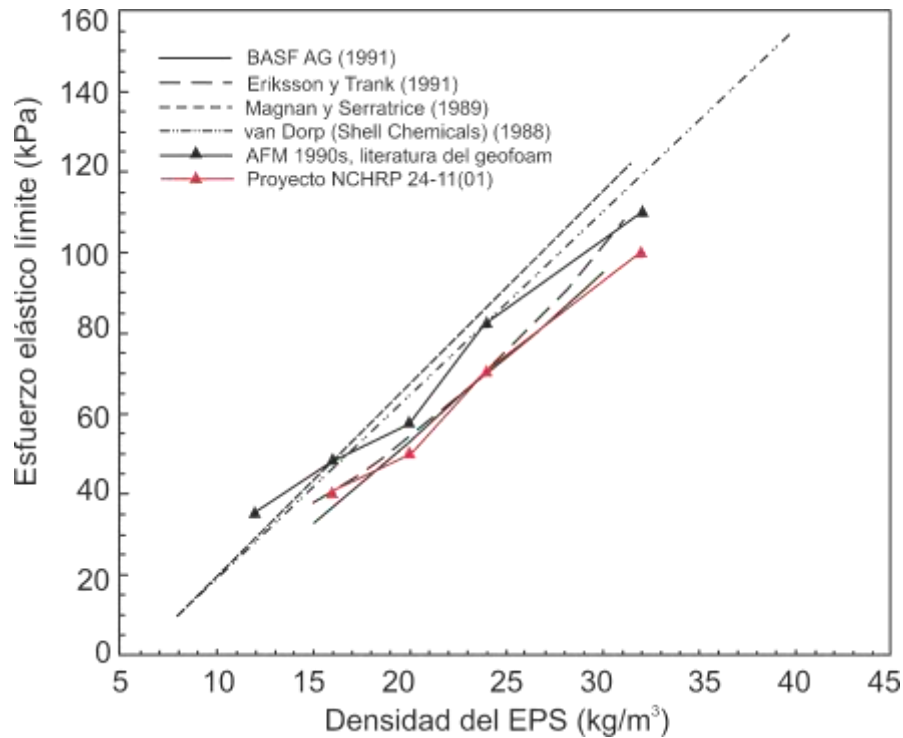


Figura 2.3. Esfuerzo elástico límite contra densidad del EPS. Comparativas relevantes para la norma del proyecto NCHRP 24-11(01)(Arellano et al., 2011b, citado por Horvath, 2012)

Otra de las propiedades que especificaron fue la densidad. La Tabla 2.1 muestra las densidades mínimas permitidas (densidad nominal o del bloque completo) y la densidad que deberían de cumplir muestras tomadas del bloque (densidad mínima). La Tabla 2.2 muestra las propiedades de los especímenes para cada densidad.

Tabla 2.1. Densidades del EPS en la norma NCHRP 24-11(01)

Designación del material		Densidad mínima permitida, kg/m ³	
NCHRP 24-11(01)	ASTM C578	Todo el bloque	Muestra para control de calidad
EPS40	I	16	15
EPS50	VIII	20	18
EPS70	II	24	22
EPS100	IX	32	29

Tabla 2.2. Propiedades mínimas permitidas del EPS especificadas en la norma NCHRP 24-11(01)

Designación del material	Densidad seca (kg/m ³)	Resistencia a compresión, kPa	Resistencia a flexión, kPa	Esfuerzo elástico límite, kPa	Módulo tangente inicial, MN/m ²
EPS40	15	69	173	40	4
EPS50	18	90	208	50	5
EPS70	22	104	276	70	7
EPS100	29	173	345	100	10

2.1.2. Norma ASTM D6817-07

La norma anterior fue la propuesta por la NCHRP, pero la ASTM también tiene su propia especificación (ASTM D6817-07). Las propiedades más relevantes indicadas en esta norma son resumidas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Propiedades físicas para los materiales EPS

Tipo	EPS12	EPS15	EPS19	EPS22	EPS29	EPS39	EPS46
Densidad mínima (kg/m ³)	11.2	14.4	18.4	21.6	28.8	38.4	45.7
Resistencia a compresión mínima a 1%, (kPa)	15	25	40	50	75	103	128
Resistencia a compresión mínima a 5%, (kPa)	35	55	90	115	170	241	300
Resistencia a compresión mínima a 10% ^A , (kPa)	40	70	110	135	200	276	345
Resistencia a flexión mínima (kPa)	69	172	207	276	345	414	517
Índice de oxígeno mínimo; % en volumen	24	24	24	24	24	24	24

^A, si la fluencia ocurre antes del 10% de deformación, reporte la resistencia a compresión y la deformación en la fluencia además de la resistencia a compresión al 1%, 5% y 10% de deformación.

Cabe señalar que existen diferencias entre la norma ASTM y la norma generada por la NCHRP, pero la segunda parece ser la más adecuada para proyectos en el área de carreteras.

3 Materiales y procedimientos de prueba

3.1. Materiales

Para este proyecto, se proporcionaron muestras cilíndricas y prismáticas. Las dimensiones de las cilíndricas era de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura y los prismas era de 50 cm de largo por 15 cm de altura por 15 cm de ancho. La masa promedio de las vigas fue de 230 g para el material tipo EPS22 y 350 g para el EPS29. El peso de los cilindros era de 120 y 150 g, respectivamente (Figura 3.1).

La nomenclatura después de las siglas EPS corresponde a la densidad mínima permitida del material. En este caso, las densidades estudiadas son la de 22 y 29 kg/m^3 .



Figura 3.1. Especímenes de EPS

3.2. Preparación de los especímenes

3.2.1. Muestras para resistencia a compresión, módulo de resiliencia y deformación permanente

Las pruebas de resistencia a compresión no confinada fueron realizadas en dos tamaños de muestras cilíndricas:

- 15 cm de diámetro y 30 cm de altura

- 7 cm de diámetro y 14 cm de altura

Las pruebas de módulo de resiliencia y deformación fueron hechas solo en muestras de 7 cm de diámetro, por 14 cm de altura. De acuerdo con esto, fue necesario diseñar un dispositivo para llevar a cabo el corte de especímenes a tamaño de 7 por 14 cm.

La primera propuesta para realizar los cortes de especímenes fue la siguiente:

- ✓ Primeramente se formó la probeta utilizando un arco al que se le colocó un alambre delgado de nicromo. El alambre se calentó para poder realizar los cortes más burdos (Figura 3.2a y b). Después se utilizó un torno de labrado y navaja para darle la forma cilíndrica al espécimen (Figura 3.2c).

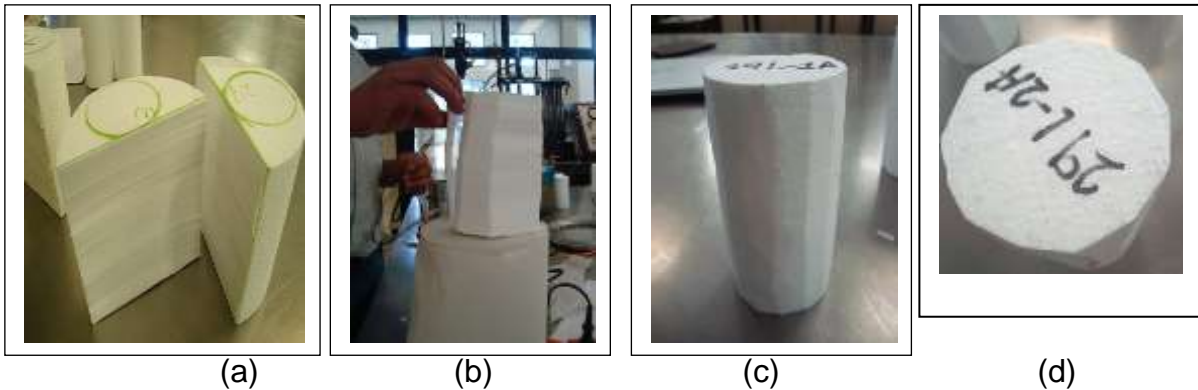


Figura 3.2. (a) Corte a mitad del cilindro; (b) Corte del material sobrante; (c) Vista lateral de la muestra labrada con torno y cutter; y (d) Vista superior de la muestra de 7.1 cm por 14.4 cm.

Una vez que se observó que esta técnica no proporcionaba una muestra completamente cilíndrica se adaptó la propuesta dos que puede ser descrita como:

- ✓ La muestra cilíndrica de 15 cm por 30 cm fue cortada en cuatro secciones y se marcaron las circunferencias para las muestras más pequeñas. De una muestra de 15 cm por 30 cm se obtuvieron cuatro muestras de 7 cm por 14 cm.

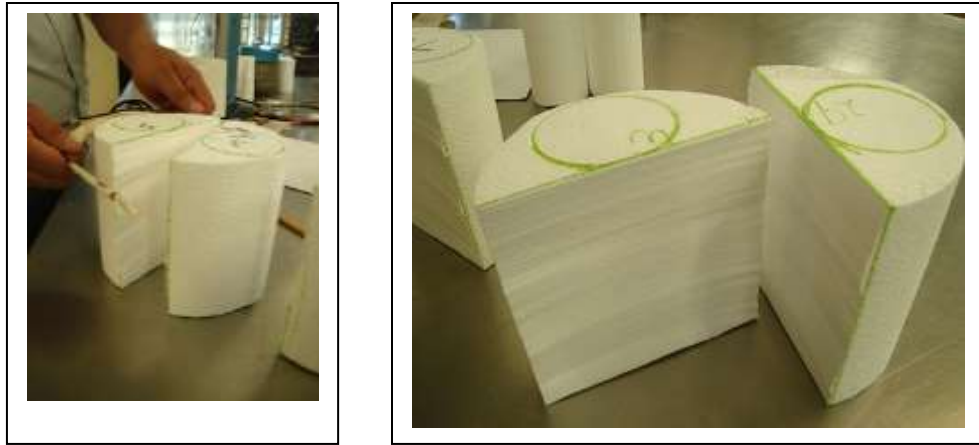


Figura 3.3. Corte de muestra de 15 por 30 cm.

- ✓ Después de haber cortado en cuatro secciones, cada una de las secciones fue moldeada a un diámetro aproximado de 7 cm y una altura de 15 cm (Figura 3.4).



(a)

(b)

Figura 3.4. (a) Corte de material sobrante de la muestra; (b) Muestras con un diámetro cercano a 7 cm.

- ✓ Después de haber cortado la mayor parte del material que le sobraba a cada espécimen, la muestra se colocó en el torno de labrado de muestras de suelo. En el torno ya había sido adaptado un alambre de nicromo que era calentado para hacer el corte a un diámetro de 7 cm (Figura 3.5).

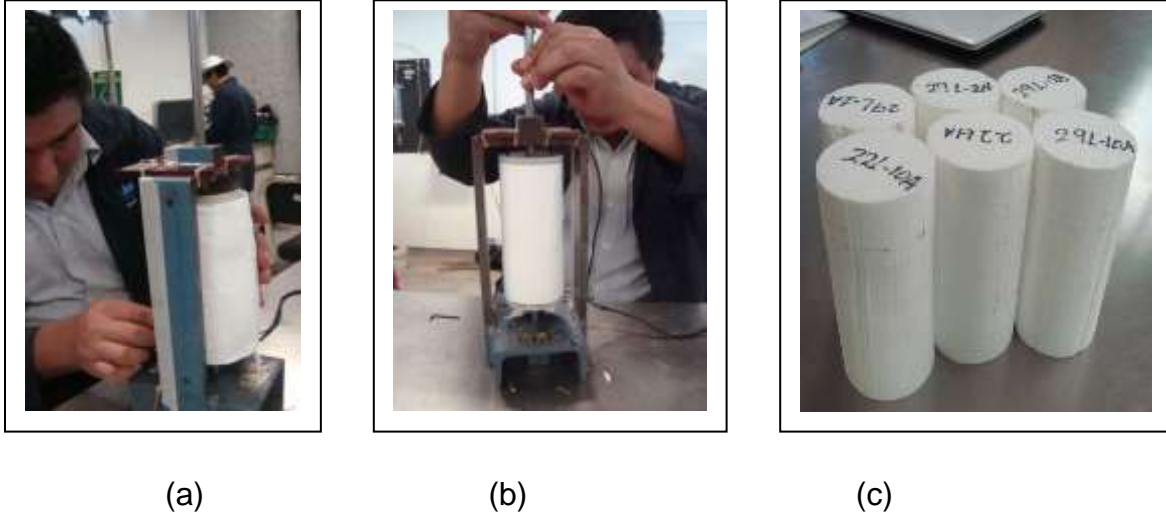


Figura 3.5. Labrado de la muestra a diámetro de 7.1 cm.

- ✓ Para realizar el corte de la muestra a la altura adecuada, ésta fue colocada en un molde de 7.1 cm de diámetro y 14.4 cm de altura; el corte de sobrante en altura fue hecho con el hilo de nicromo colocado en un arco (Figura 3.6a y b). Finalmente, se obtuvo una muestra con una forma cilíndrica adecuada (Figura 3.6c).

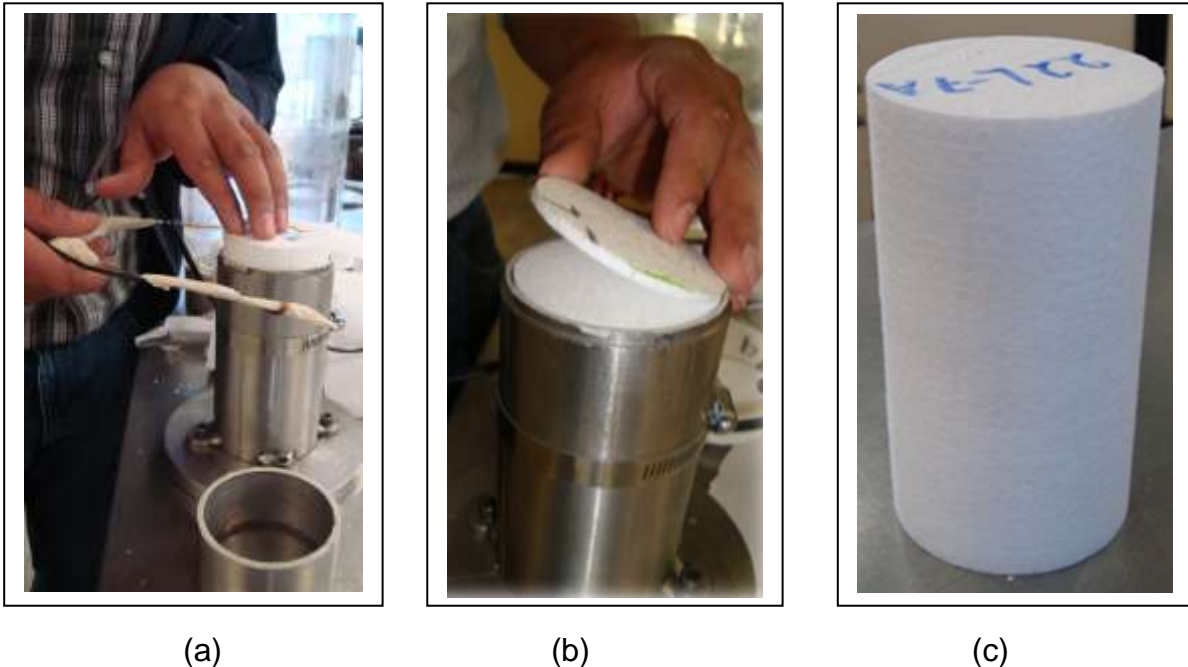


Figura 3.6. (a) y (b) Corte del material restante en altura; (c) Muestra final con dimensiones 7.1 cm de diámetro y 14.4 cm de altura.

3.2.2. Muestras para la prueba de flexión

Las especímenes para determinar la resistencia a flexión del concreto son prismas de 15 cm por 15 cm por 50 cm. Para determinar el valor de flexión del EPS, se solicitó que las muestras proporcionadas tuvieran dichas dimensiones. Por lo tanto, para esta prueba no se tuvo que llevar a cabo ningún corte.

3.3. Procedimientos de prueba

3.3.1. Resistencia a compresión (ASTM D1621-10)

Acondicionamiento de la muestra

Previo a la prueba, los especímenes se colocaron en un cuarto donde la temperatura se controla a $23\pm 2^{\circ}\text{C}$. Los especímenes permanecieron en estas condiciones por más de tres días.

Procedimiento de prueba

- ✓ Se tomaron las dimensiones del espécimen.
- ✓ Se colocó el espécimen entre los cabezales de prueba asegurándose de centrarlo, para que la carga se aplicara uniformemente.
- ✓ Se lleva a cabo la compresión del espécimen a una velocidad de 1.2%/min o 10%/min.
- ✓ Se registró la carga y el desplazamiento.
- ✓ La prueba lleva a cabo hasta alcanzar el punto de fluencia.

La Figura 3.7 muestra el equipo en el que se llevaron a cabo las pruebas.



Figura 3.7. Muestra EPS geofoam en equipo triaxial

3.3.2. Resistencia a flexión

Espécimen de prueba

Los especímenes de prueba utilizados en la primera parte del trabajo fueron prismáticos de 15 cm de espesor por 15 cm de ancho por 50 cm de longitud.

Una vez que el espécimen fue colocado en la base de prueba (Figura 3.8a), se le aplicó la carga controlando el desplazamiento a una velocidad de 1.2%/min o 10%/min. La prueba se terminó cuando se presentaba la falla en la viga (Figura 3.8b). Cabe señalar que en la parte inferior de la viga se adhirió una placa de aluminio a la que le fueron adosados dos LVDTs para medir la deflexión en la fibra inferior de la viga. Con la deflexión máxima obtenida, se calculó el módulo de elasticidad y la deformación de tensión de la viga, utilizando las ecuaciones de elasticidad.

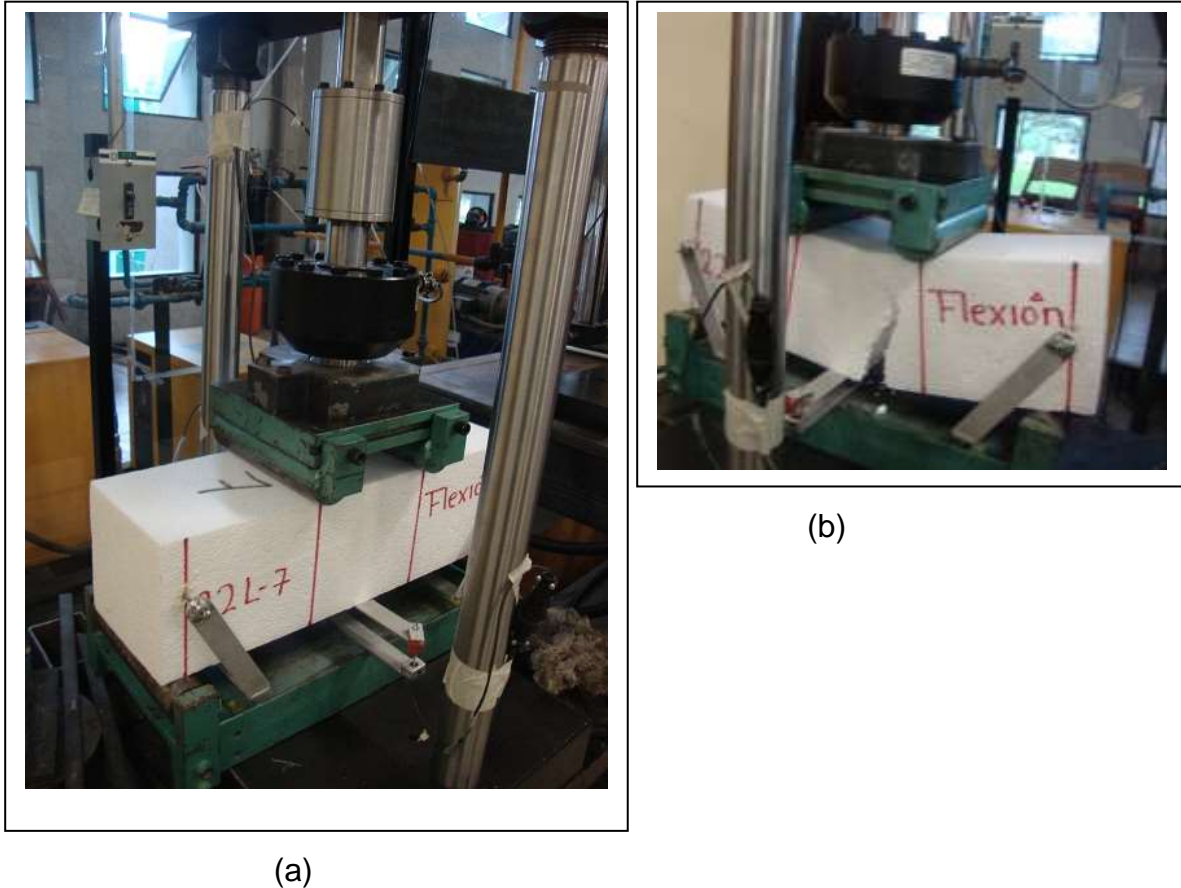


Figura 3.8. (a) Muestra colocada en el soporte; (b) Muestra una vez que se presenta la falla

3.3.3. Módulo de resiliencia

Definición de módulo de resiliencia

Los problemas en el diseño de pavimentos están relacionados con la resistencia y las deformaciones de los materiales; es decir, resulta necesario conocer cuánto se va a deformar un material al que se le será aplicada una carga, y determinar si tales deformaciones pueden estar dentro de los límites permisibles.

En el caso de un pavimento, la sollicitación es la carga del tránsito que circulará por dicha vía. Hace algunos años, la propiedad para caracterizar los materiales era el valor relativo de soporte; propiedad que, por la forma en la que es determinada, no simula las condiciones a las que estará expuesto el material en campo. Por esto, en 1955, Seed introdujo el parámetro módulo de resiliencia, el cual definió como la relación entre el esfuerzo desviador y la deformación

recuperable. Este parámetro se determina a partir de una prueba de carga cíclica. Como ecuación, puede ser expresada de la siguiente forma:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (3.1)$$

En donde: σ_d = Esfuerzo desviador y ε_r = Deformación recuperable

Lo anterior se puede explicar a partir de una prueba de carga cíclica de la siguiente forma: Primeramente, se aplica al espécimen una carga de cierta amplitud (que está relacionada con la carga a la que va a estar sujeto el material en el campo) durante un cierto número de ciclos. Durante la aplicación de la carga la deformación del espécimen será de dos tipos, una parte será recuperable y otra permanente (Figura 3.9). Sin embargo, llega un cierto número de ciclos en los cuales toda la deformación es recuperable, en ese momento se dice que el material está en un estado elástico, y es en esta condición que se calcula el módulo de resiliencia (Figura 3.9a).

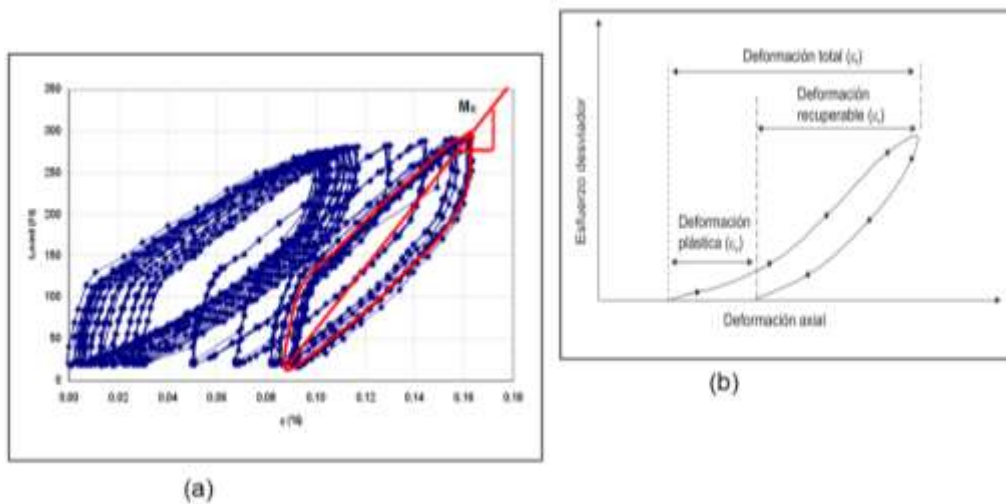


Figura 3.9. (a) Ciclos histeréticos para un nivel de carga en una prueba de módulo de resiliencia; (b) Diagrama esquemático de la deformación plástica y recuperable en un ciclo de carga

Prueba de laboratorio para determinar el módulo de resiliencia

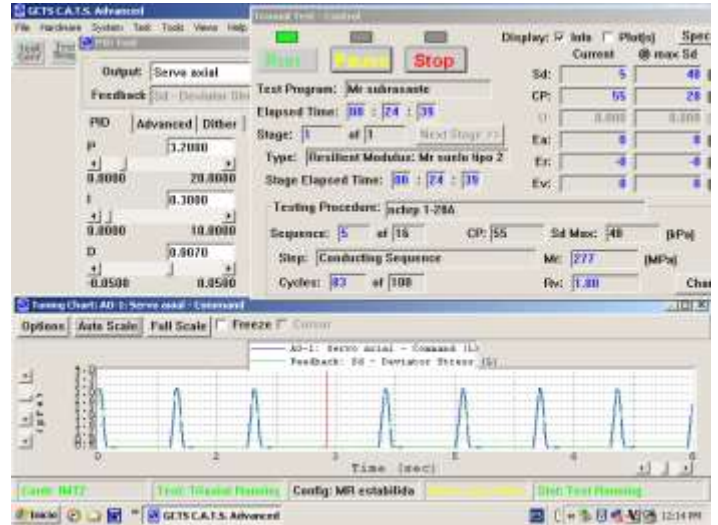
El protocolo utilizado para determinar el M_r corresponde al NCHRP 1-28A denominado “**Determinación del módulo de resiliencia para diseño de pavimentos flexibles**”.

Para llevar a cabo este tipo de prueba, se requiere un equipo triaxial capaz de aplicar cargas en forma cíclica y que –además– cuente con los sensores

adecuados para determinar las deformaciones que se presentan en el espécimen. Para las pruebas realizadas se utilizó el equipo triaxial cíclico que aparece en la Figura 3.10a. En esta misma figura se muestra que la carga se aplica con una función senoidal con un desfase de 270°. El tiempo de aplicación de la carga es de 0.2 de segundo y después tiene un periodo de descarga de 0.8 de segundo (Figura 3.10b).



(a)



(b)

Figura 3.10. (a) Equipo triaxial para determinar el módulo de resiliencia; (b) Vista de la aplicación de la carga cíclica al espécimen contra el tiempo

En la prueba se aplican una serie de esfuerzos desviadores así como presiones de confinamiento. La Tabla 3.1 indica estos valores, según el protocolo NCHRP 1-28A.

Tabla 3.1. Esfuerzos de confinamiento y desviadores aplicados en la prueba de módulo de resiliencia, según el protocolo NCHRP 1-28A

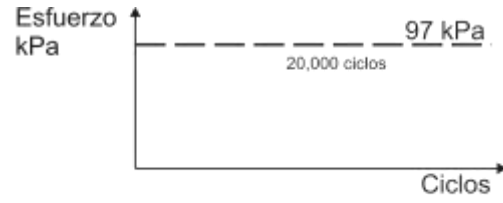
Secuencia No.	Confinamiento, σ_3 (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	No. de repeticiones
0	27.6	48.3	1000
1	55.2	27.6	100
2	41.4	27.6	100
3	27.6	27.6	100
4	13.8	27.6	100
5	55.2	48.3	100
6	41.4	48.3	100
7	27.6	48.3	100
8	13.8	48.3	100
9	55.2	69.0	100
10	41.4	69.0	100
11	27.6	69.0	100
12	13.8	69.0	100
13	55.2	96.6	100
14	41.4	96.6	100
15	27.6	96.6	100
16	13.8	96.6	100

3.3.4. Deformación permanente

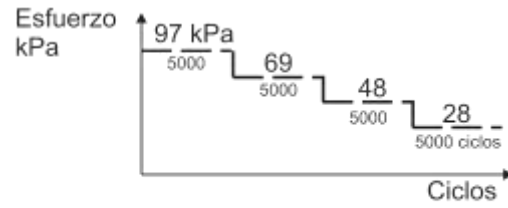
En el diseño de pavimentos, no solo es importante determinar el módulo de resiliencia; la deformación permanente también constituye otro parámetro a evaluar para los materiales que constituirán la estructura del pavimento. Su evaluación no ha sido normada hasta la fecha, sin embargo, en esta investigación se utilizaron muestras de EPS de 7 cm de diámetro por 14 cm de altura (aproximadamente). Las muestras se colocaron en el equipo triaxial y enseguida se les aplicó 20 000 ciclos de carga. Los estados de esfuerzo para los cuales fue determinada la deformación permanente se encuentran dentro de los utilizados en la prueba de módulo de resiliencia.

Cabe señalar que las pruebas se llevaron a cabo en tres diferentes formas:

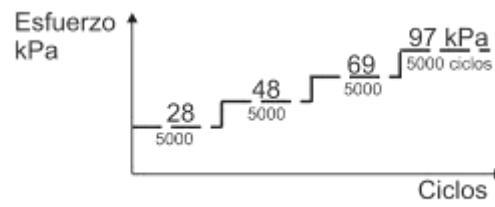
- ✓ Aplicando el nivel de esfuerzo mayor durante los 20 000 ciclos. El confinamiento fue 13.8 kPa y se mantuvo constante durante toda la prueba (Figura 3.11a).
- ✓ Se aplicaron cuatro niveles de carga, variando la carga cada 5000 ciclos. Iniciando de mayor a menor. El confinamiento fue 13.8 kPa para las cuatro fases.
- ✓ Se aplicaron cuatro niveles de carga, variando la carga a cada 5000 ciclos. Iniciando de menor a mayor. El confinamiento fue 13.8 kPa para las cuatro fases.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.11. (a) Prueba con una fase de carga; (b) Prueba con cuatro fases de carga. Carga reduciéndose; (c) Prueba con cuatro fases de carga. Carga incrementándose

4 Resultados

4.1. Resistencia a compresión

De acuerdo con la normativa, la resistencia a compresión a valores específicos de deformación es de especial relevancia para los bloques de EPS. En este inciso se muestran los resultados obtenidos para los dos tipos de densidades proporcionados.

Como se mencionó en párrafos anteriores, las muestras para resistencia a compresión eran de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Inicialmente, fue este el tamaño de muestra ensayada a una velocidad de 1.2%/min (velocidad típica para ensaye en suelos); sin embargo, también se ensayaron muestras de 7 por 14 cm, las cuales fueron moldeadas a partir de las muestras de mayor tamaño.

La Figura 4.1 muestra las curvas esfuerzo-deformación para los dos tipos de densidades y los dos tamaños de muestra. La Tabla 4.1 muestra las propiedades de cada espécimen así como los valores del esfuerzo a los diferentes niveles de deformación requeridos por la norma, así también se indican los valores de módulo tangente inicial.

Tabla 4.1. Propiedades de las muestras ensayadas en compresión no confinada

Muestra No.	d_{prom} (cm)	h_{prom} (cm)	Peso (g)	ρ (kg/m ³)	$\sigma_{1\%}$ (kPa)	$\sigma_{5\%}$ (kPa)	$\sigma_{10\%}$ (kPa)	E_i (MPa)
22L1	14.99	30.00	120.14	23	67.90	112.5	122.90	6.9
22L10	14.88	30.08	120.14	23	65.63	112.28	122.25	6.6
29L2	15.00	29.74	150.10	29	96.70	153.80	167.30	9.8
29L10	15.35	30.11	161.23	29	104.68	167.93	180.53	10.6
22L7B	6.96	14.30	12.16	22	75.60	124.50	135.6	7.6
29L-5B	6.88	14.34	14.79	28	97.00	169.50	180.60	9.9

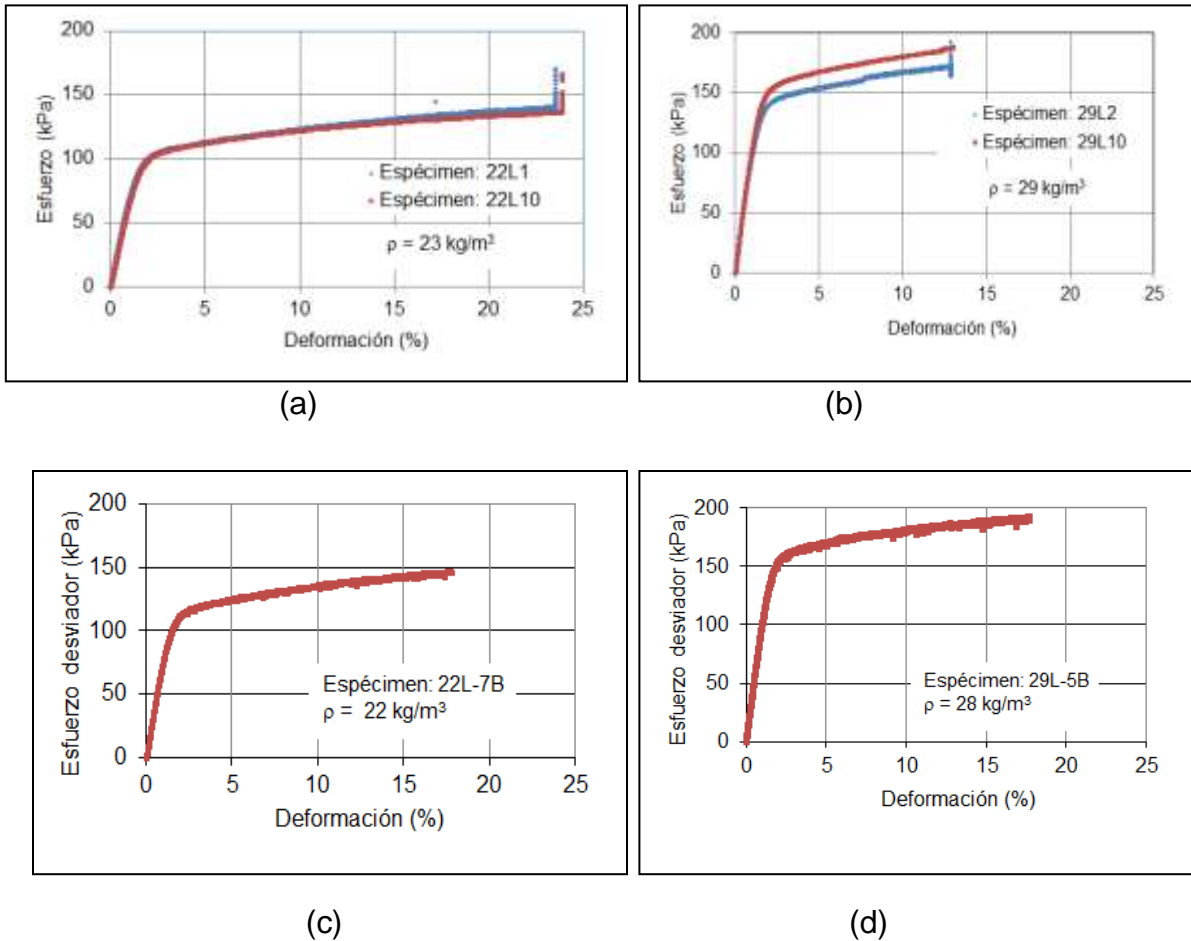


Figura 4.1. Curvas esfuerzo-deformación. (a) $\rho = 22 \text{ kg/m}^3$ y muestras 15 por 30 cm; (b) $\rho = 29 \text{ kg/m}^3$ y muestras 15 por 30 cm; (c) $\rho = 22 \text{ kg/m}^3$ y muestras 7 por 14 cm; (d) $\rho = 29 \text{ kg/m}^3$ y muestras 7 por 14 cm.

De los valores de módulo tangente inicial mostrados en la Tabla 4.1, se observa que el tamaño de muestra sí afecta el valor obtenido; en este caso, para muestra más pequeña, el módulo tangente inicial incrementó (muestras 22L1, 22L10 y 22L7B) (muestras con $\rho = 22 \text{ kg/m}^3$). Por otro lado, para las muestras con densidad de 29 kg/m^3 , el tamaño de espécimen parece no afectar el módulo tangente inicial (muestras 29L2, 29L10 y 29L-5B).

La Figura 4.2, indica que si se incrementa la densidad, la resistencia y el módulo también presentan la misma tendencia, sin embargo, es claro que un cambio en densidad parece no modificar el rango elástico en cuanto a deformación.

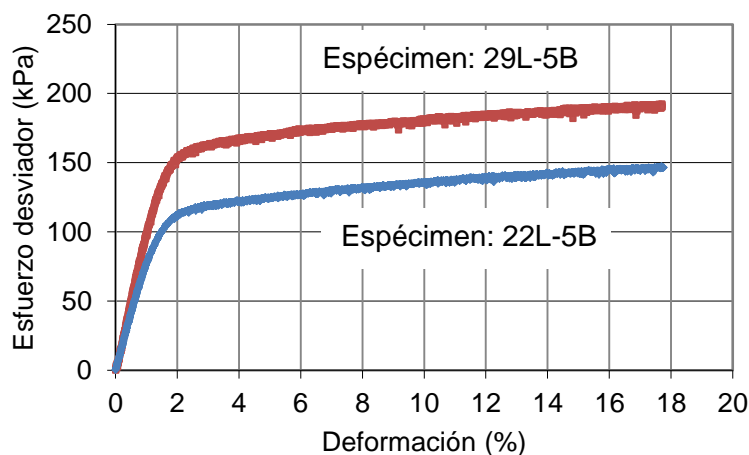


Figura 4.2. Comparativa de las curvas esfuerzo-deformación de una muestra con 22 kg/m^3 de densidad y otra de 29 kg/m^3 .

Con respecto a repetitividad de resultados, las muestras 22L1 y 22L10 proporcionan curvas esfuerzo-deformación similares; las muestras 29L2 y 29L10, muestran diferencias en las curvas esfuerzo-deformación cuando se rebasa el rango elástico.

Si se comparan los valores de resistencia a compresión a los diferentes porcentajes de deformación con respecto a lo que indica la norma ASTM D6817-07, se observa que en el caso de los especímenes de 15 por 30 cm, se obtienen valores mayores a lo que indica la norma para el 1% de deformación, para el 5 y 10%, los valores obtenidos son inferiores a los indicados en la norma. Curiosamente, cuando la muestra se reduce en tamaño (a 7 por 14), los esfuerzos obtenidos para cada nivel de deformación cumplen con la normativa, excepto para el 10% de deformación de la muestra 29L-5B.

Tabla 4.2. Comparativa de los esfuerzos obtenidos en las pruebas y lo que indica la norma ASTM D6817-07

Muestra No.	ρ (kg/m^3)	$\sigma_{1\%}$ (kPa)	$\sigma_{1\%}$ (ASTM D6817-07) (kPa)	$\sigma_{5\%}$ (kPa)	$\sigma_{5\%}$ (ASTM D6817-07) (kPa)	$\sigma_{10\%}$ (kPa)	$\sigma_{10\%}$ (ASTM D6817-07) (kPa)
Muestras de 15cm de diámetro por 30 cm de altura							
22L1	23	67.90	50	112.5	115	122.90	135
22L10	23	65.63	50	112.28	115	122.25	135
29L2	29	96.70	75	153.80	170	167.30	200
29L10	29	104.7	75	167.93	170	180.53	200
Muestras de 7cm de diámetro por 14 cm de altura							
22L7B	22	75.60	50	124.50	115	135.6	135
29L-5B	28	97.00	75	169.50	170	180.60	200

El documento NCHRP 24-11(01) indica los módulos de elasticidad tangente para cada uno de los tipos de EPS. Si se comparan con los valores obtenidos en esta investigación, se observan valores similares.

Tabla 4.3. Comparativa de los valores de módulo tangente inicial con los indicados por NCHRP 24-11(01)

Muestra No.	Tamaño de la muestra cilíndrica	E_i (MPa)	$E_{NCHRP\ 24-10}$ (MPa)
22L1	15 cm de diámetro x 30 cm de altura	6.9	7
22L10	15 x 30	6.6	7
29L2	15 x 30	9.8	10
29L10	15 x 30	10.6	10
22L7B	7 x 14	7.6	7
29L-5B	7 x 14	9.9	10

4.2. Resistencia a flexión

La Tabla 4.4 resume las características de las cuatro muestras ensayadas en prueba de flexión. Asimismo, muestra los valores de módulo de ruptura y el módulo de elasticidad inferido a partir de la deflexión máxima en la fibra inferior de la viga.

Tabla 4.4. Propiedades de las muestras ensayadas, valores de MR y módulo de elasticidad

Muestra No.	b_{prom} (cm)	h_{prom} (cm)	L (g)	Peso g	ρ (kg/m ³)	P (kg)	MR (kPa)	ϵ_t	E (MPa)
Velocidad de prueba: 1.2%/min									
22L1	15.00	14.87	50.00	230.85	20.70	67.29	89.5	0.0077	11.57
22L7	15.03	14.91	50.00	236.30	21.09	154.90	111.8	0.0093	11.90
29L8	14.87	14.98	50.00	344.50	30.93	118.28	157.9	0.0088	17.94
29L1	15.17	15.06	50.00	337.40	29.54	124.40	159.6	0.0095	16.86
Velocidad de prueba: 10%/min									
22L6	14.97	14.96	50.00	253.36	22.63	87.69	115.4	0.0092	12.5
22L8	15.22	14.92	50.00	271.25	23.89	94.83	123.6	0.0085	14.6
29L5	15.02	15.12	50.00	361.20	31.81	131.54	169.1	0.0092	18.3
29L2	14.97	14.93	50.00	325.93	29.17	119.3	157.9	0.0088	17.9

Nomenclatura: b = ancho, h = espesor, L = longitud, ρ = densidad, MR = módulo de ruptura, P = Carga máxima, ϵ_t = Deformación de tensión en la fibra inferior, E = Módulo de elasticidad

De acuerdo con los resultados anteriores, si la densidad del EPS también aumenta el módulo de ruptura. Con respecto al módulo de elasticidad obtenido con la deflexión máxima medida, se observa que estos son más altos que los obtenidos en muestras cilíndricas.

Si se comparan los valores de resistencia a flexión de la norma con lo obtenido en los especímenes ensayados, se observan que los valores obtenidos en la pruebas se encuentran por debajo de lo indicado por la norma (Tabla 4.5). Esto podría deberse a la geometría de los especímenes, puesto que no está de acuerdo con la norma ASTM C203-05^a.

Tabla 4.5. Valores de resistencia a flexión para EPS22 y EPS29 de acuerdo con la norma ASTM D6817-07

Tipo	EPS22	EPS29
Resistencia a flexión mínima (kPa)	276	345

Para determinar evaluar la repetitividad de los resultados obtenidos en las vigas, se llevaron a cabo dos pruebas para cada densidad. La Figura 4.3 muestra las curvas deflexión versus esfuerzo para dos vigas de 29 kg/m³ (velocidad = 10%/min). En esta figura aparecen resultados similares para ambos especímenes; el espécimen con una densidad mayor (29L5) (31.81 kg/m³) soporta ligeramente mayor esfuerzo a la falla.

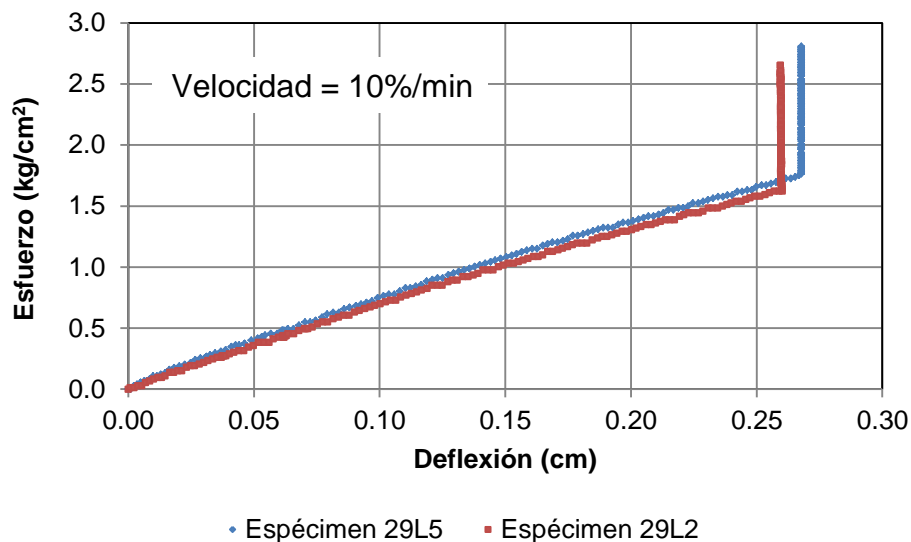


Figura 4.3. Curvas de deflexión para dos especímenes de 29 kg/m³

El incremento en el módulo de ruptura con el incremento en la densidad es producto de un incremento en rigidez, como ya se había observado en las curvas esfuerzo-deformación de las muestras cilíndricas. En el caso de las pruebas de módulo de ruptura, también se pueden graficar las curvas de deflexión en la fibra inferior de la viga contra el esfuerzo aplicado. La Figura 4.4 indica que para un mismo esfuerzo, la viga con mayor densidad soporte menos deflexión, lo que indica una mayor rigidez del material.

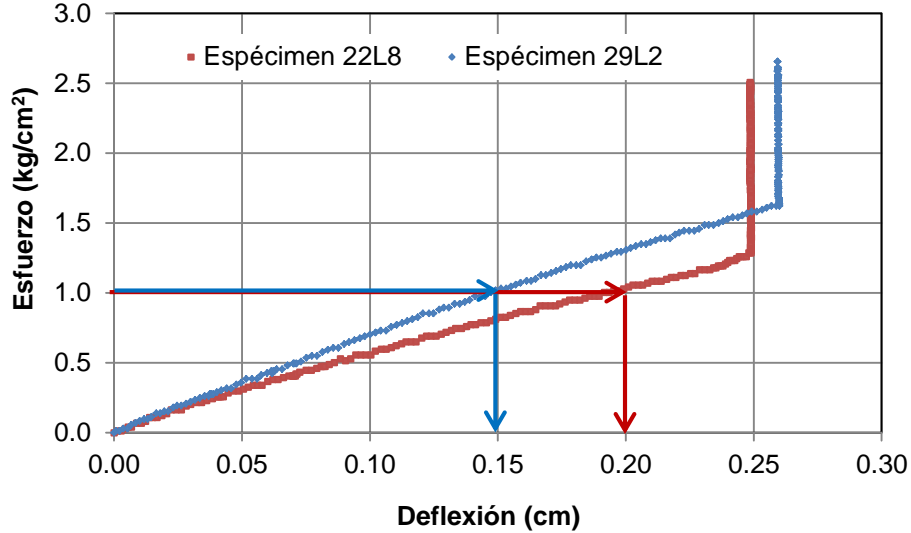


Figura 4.4. Curvas de deflexión para los especímenes de ambas densidades (22 y 29 kg/m³)

4.3. Módulo de resiliencia

El módulo de resiliencia constituye uno de los parámetros más importantes en el diseño de pavimentos. Si se tiene contemplado colocar el EPS como parte de la estructura de una carretera, entonces es importante determinar este parámetro.

Es común que la mayor parte de las propiedades por evaluar en un material tengan un procedimiento de prueba, ya sea desarrollado a nivel nacional o internacionalmente. El EPS fue originalmente visualizado como un material aislante de construcción para edificios y no para carreteras; por lo tanto, el módulo de resiliencia no es una propiedad que se determine comúnmente, por lo tanto, el procedimiento para determinarlo no existe. En esta investigación se utilizó el protocolo NCHRP 1-28A. La secuencia de carga utilizada fue la de materiales de subrasante. Los ensayos realizados se llevaron a cabo en especímenes cilíndricos pequeños; las dimensiones, peso y densidad de cada uno aparecen en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Propiedades de las muestras ensayadas en módulo de resiliencia

Muestra No.	d _{prom} (cm)	h _{prom} (cm)	Peso (g)	ρ (kg/m ³)
22L4A	6.96	14.30	11.65	21
22L98	6.73	14.30	11.72	23
29L5A	6.96	14.40	15.65	29
29L8A	6.99	14.35	15.29	28

Los módulos de resiliencia obtenidos para ambas densidades son mostrados en la Figura 4.5. Lo que indican los resultados es que el esfuerzo desviador tiene mayor efecto en el M_r de las muestras con menor densidad. Para el EPS, el confinamiento no es una variable que afecta el módulo de resiliencia. Como ya se había observado en las pruebas de compresión, la rigidez -en este caso el módulo de resiliencia- es mayor para los especímenes de mayor densidad.

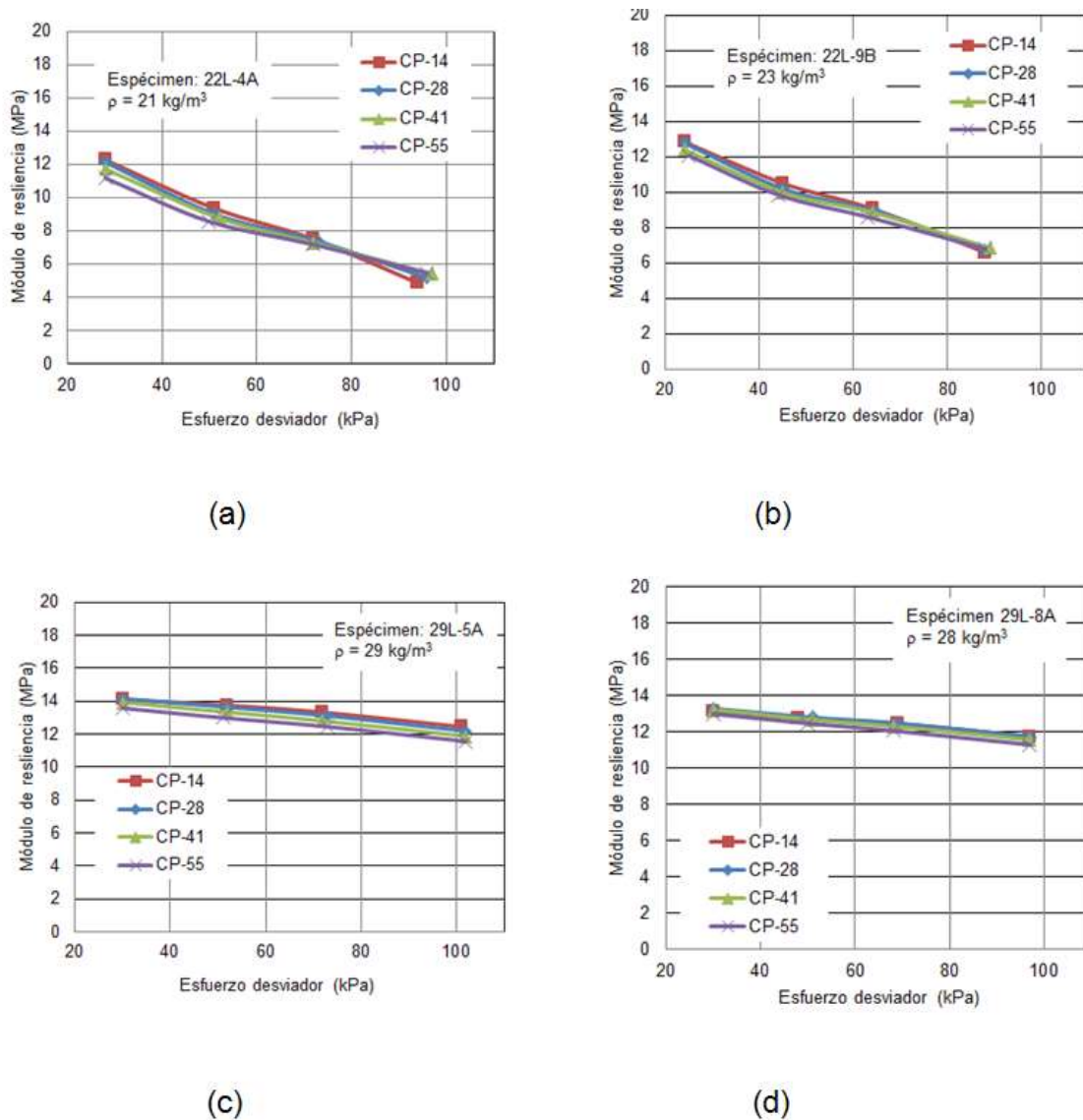


Figura 4.5. (a) y (b) Módulo de resiliencia de los especímenes de 22 kg/m^3 ; (c) y (d) Módulo de resiliencia para especímenes de 29 kg/m^3 .

Una explicación más a detalle de lo que muestran las gráficas anteriores es la siguiente:

- ✓ Primero, se observa que a mayor esfuerzo desviador, el módulo de resiliencia disminuye aunque este efecto es más notorio en los especímenes de menor densidad. Esto resulta evidente de forma más clara si se grafican los ciclos para un mismo nivel de presión de confinamiento y se varían los esfuerzos desviadores.

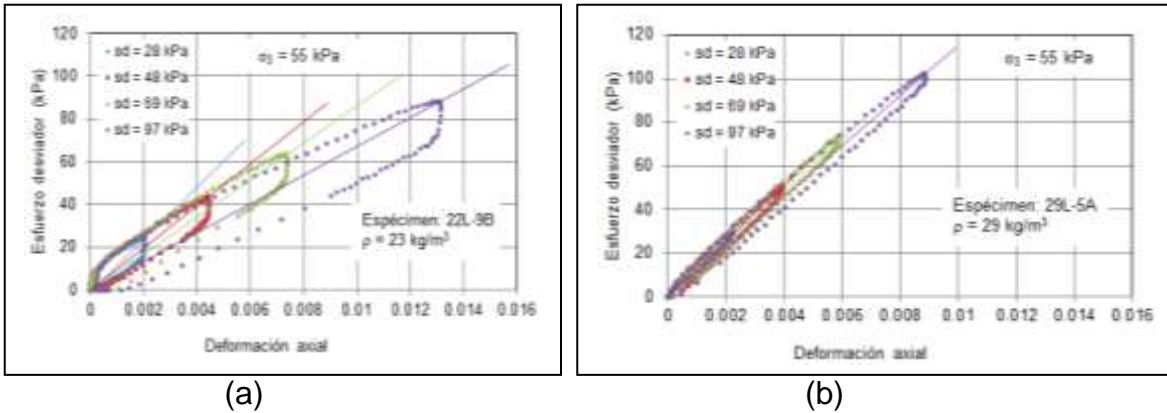


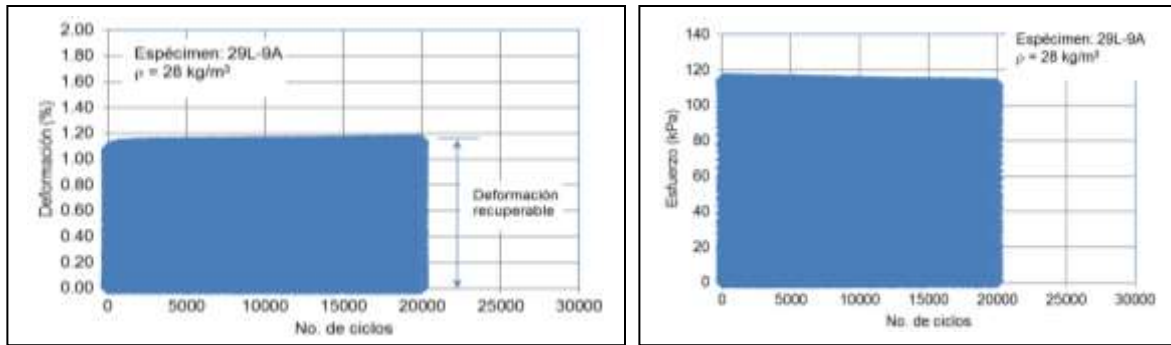
Figura 4.6. (a) Ciclos carga-descarga para espécimen de 23 kg/m^3 ; (b) Ciclos carga-descarga para espécimen de 29 kg/m^3 .

- ✓ El segundo punto por observar es la energía disipada para el EPS de ambas densidades. Un incremento en densidad reduce la disipación de energía.
- ✓ El tercer aspecto es que a mayor densidad, el módulo de resiliencia no se ve afectado de forma importante por el esfuerzo desviador. La Figura 4.6b indica una ligera variación en la pendiente de los ciclos carga-descarga.

4.4. Deformación permanente

4.4.1. Prueba en una fase de carga

De acuerdo con todo lo reportado en la literatura; mientras el esfuerzo aplicado en los especímenes de prueba esté dentro del rango elástico, no se presentará ninguna deformación permanente. En la Figura 4.7 se observa este comportamiento, ya que para todos los ciclos aplicados en el espécimen 29L-9A toda la deformación es recuperable. Cabe señalar que el esfuerzo aplicado en el espécimen fue aproximadamente 120 kPa, lo que está por debajo del valor donde se presenta la fluencia del material (Figura 4.1a y b).



(a)

(b)

Figura 4.7. (a) Deformación contra número de ciclos para el espécimen de 28 kg/m^3 ; (b) Número de ciclos contra el esfuerzo aplicado para el espécimen de 28 kg/m^3 .

4.4.2. Prueba en cuatro fases

La deformación permanente de un material depende en gran medida de su historia de esfuerzos. Por lo tanto, en esta investigación se incluyeron pruebas en la que se observara este efecto.

Para lograr el objetivo, en una probeta de 7 cm de diámetro por 14 cm de altura, se le aplicaron cuatro fases de carga. Cada fase fue de 5000 ciclos. Los esfuerzos aplicados fueron:

Fase 1: $\sigma_d = 118 \text{ kPa}$ y $\sigma_3 = 14 \text{ kPa}$,

Fase 2: $\sigma_d = 84 \text{ kPa}$ y $\sigma_3 = 14 \text{ kPa}$,

Fase 3: $\sigma_d = 58 \text{ kPa}$ y $\sigma_3 = 14 \text{ kPa}$,

Fase 4: $\sigma_d = 27 \text{ kPa}$ y $\sigma_3 = 14 \text{ kPa}$,

La Figura 4.8a muestra tanto la gráfica de número de ciclos contra deformación permanente, la Figura 4.8b indica número de ciclos contra esfuerzo aplicado. De acuerdo con los resultados, para los cuatro niveles de esfuerzo aplicado, toda la deformación es recuperable (Figura 4.8a). Esto se debe a que los esfuerzos aplicados están dentro del rango elástico del EPS de densidad 29 kg/m^3 .

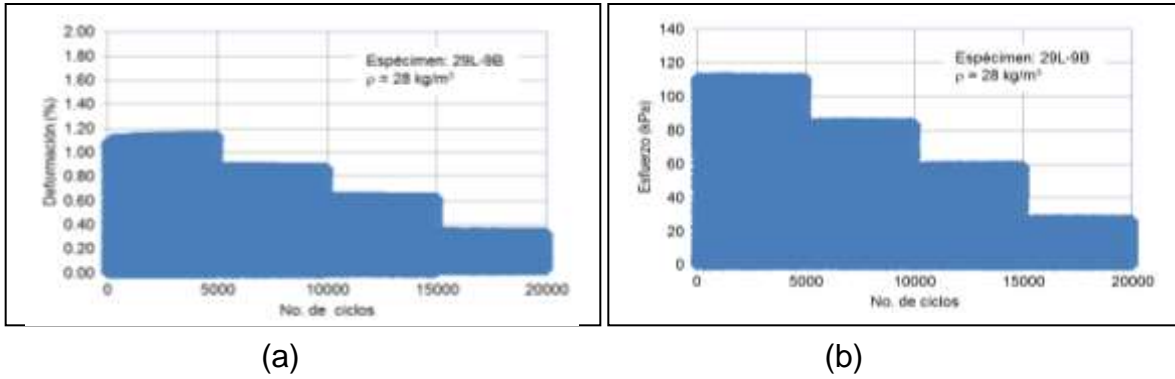


Figura 4.8. (a) Deformación contra número de ciclos para el espécimen de 28 kg/m^3 ; (b) Número de ciclos contra el esfuerzo aplicado para el espécimen de 28 kg/m^3 .

5 Conclusiones

Este documento muestra los resultados de propiedades mecánicas obtenidos con los especímenes de EPS de 22 y 29 kg/m³. Las conclusiones que se desprenden de esta investigación son las siguientes:

- ✓ El EPS es un material que ha sido utilizado con bastante éxito, en diferentes obras de ingeniería de acuerdo a lo reportado en la literatura.
- ✓ En México, el EPS ha sido utilizado en pocas obras; lo que quizá se deba a que no se tiene conocimiento de su comportamiento y propiedades. De igual manera, no existe normativa ni especificaciones.
- ✓ Los resultados de módulo tangente inicial obtenido para ambos tipos de EPS son similares a los reportados en la literatura.
- ✓ Los valores de resistencia a tensión son diferentes a los reportados en la norma ASTM D6817-07. Esto puede deberse a que en esta investigación se utilizó una viga de 15 cm de ancho por 15 cm de altura por 50 cm de longitud. La norma para EPS requiere otras dimensiones de espécimen; también la carga es aplicada en diferente forma.
- ✓ Con respecto a módulo de resiliencia, éste se incrementa a medida que aumenta la densidad del material.
- ✓ El confinamiento no afecta el valor del módulo de resiliencia.
- ✓ El esfuerzo desviador tiene un mayor efecto en el módulo de resiliencia de EPS con menos densidad.
- ✓ El EPS de mayor densidad presenta menor capacidad de amortiguamiento.
- ✓ De las pruebas de deformación en muestras de 29 kg/m³ se obtuvo que no se acumula deformación permanente en el espécimen de prueba si el nivel de carga aplicado está dentro del rango elástico.
- ✓ La prueba de deformación en cuatro fases (carga reduciéndose) indicó que para todas las fases de carga toda la deformación es recuperable. Esto nuevamente puede deberse a que los niveles de esfuerzo aplicados están dentro del rango de esfuerzos en donde el material EPS de 29 kg/m³ es elástico.

Referencias

Research Results Digest. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP_rrd_380. January 2003.

Duskov, M. (2000). Dutch Design Manual for Lightweight Pavements with Expanded Polystyrene Geofam. Transportation Research Record 1736. Paper No. 00-0722.

Horvath, J. S. (1999). Lessons learned from failures involving Geofam in Roads and Embankments. Manhattan College Research Report No. CE/GE-99-1.

Styropor. Technical Information. Styropor foam as a lightweight construction material for road base-courses. June 1991/September 1993.

Brun, C. (2001). GEOFOAM en Ingeniería Vial: Una alternativa a considerer. Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica. No. 2. Facultad de Ingeniería. Universidad de Montevideo.

Horvath, J.S. (2010). Emerging Trends in Failures Involving EPS-Block Geofam Fills. Journal of Performance of Constructed Facilities. July/August 2010. Pp. 1-8.

Alfheim, S., Flaate, K., Refsdal, G., Rygg, N., Aarthus, K. (2011). The first EPS Geoblock Road Embankment-1972.

Horvath, J.S. (2012). The evolution of generic material standards for block-molded expanded polystyrene (EPS) used for small-strain geofam applications in the USA. Research Report No. CEEN/GE-2012-1. May 2012.

Awol, T. A. (2012). A parametric study of creep on EPS geofam embankments. Norwegian University of Science and Technology. Department of Civil and Transport Engineering.

Padade, A.H., y Mandal, J.N. (2012). Behavior of expanded polystyrene (EPS) Geofam under triaxial loading conditions. EJGE. Vo. 17. Pp. 2543-2553.

Negussey, D., Singh, S., Andrews, L., Liu, C., y Birhan, A. (2014). Investigation of the I88 Carrs Geofam Failure. Geofam Research Center. Syracuse University.

Lin, L.-K., Chen, L.H., y Chen, R.H. (2010). Evaluation of geofam as a geotechnical construction material. Journal of materials in civil engineering. February 2010. Pp. 160-170.

Elragi, A.F. (2006). Selected Engineering properties and applications of EPS Geofoam.

Arella, D., Stark, T., Horvath, J., Leshchinsky, D. y Kafash, M. (2011). Overview of NCHRP Design Guideline for EPS-block Geofoam in Slope Stabilization and Repair. 4th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications (EPS2011 Norway). June 6-8, 2011.

Duškov, M. (1997). EPS as a light-weight subbase material in pavements structures.

Horvath, J. (1997). The evolution of generic material standards for block-molded expanded polystyrene (EPS) used for small-strain geofoam applications in the U.S.A. Research Report No. CEEN/GE-2012-1. Manhattan College. School of Engineering. May 2012.

Horvath, J. (1998). The compressible-inclusion function of EPS geofoam: An overview of concepts, applications, and products. Report No. CE/GE-98-1. Manhattan College. School of Engineering. March 1998.

Páginas web

<http://univfoam.com/learning-center/eps-process>. Consultada 2 de junio de 2015.

<http://www.fpmfoam.com/how-is-eps-manufactured.htm>

http://www.um.edu.uy/_upload/_descarga/web_descarga_161_geofoam.pdf

<http://www.civil.utah.edu/~bartlett/Geofoam/2a%20-%20EPS%20-%20the%20first%20geoblock%20road%20embankment%20-%201972%20%20final%202011-05-30%20GRE.pdf>

<http://www.betong.net/ikbViewer/Content/823050/02-Refsdal-The%20First%20Geoblock%20Fill.pdf>

<http://theinventors.org/library/inventors/blpolystyrene.htm>

<http://avisos-espanol.es/geofoam>

Normativa

NCHRP 1-28A “Recommended standard test method for routine resilient modulus testing of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils”. Del National Cooperative Highway Research Program. Project 1-28A.

ASTM C203-05a. Standard Test Methods for breaking load and flexural properties of block-type thermal insulation.

ASTM D1621-10. Standard test method for compressive properties of rigid cellular plastics.

ASTM D6817-07. Standard specification for rigid cellular polystyrene geofoam.

ASTM C578. Standard Specification for rigid, cellular polystyrene thermal insulation.

NCHRP 24-11. Guidelines for geofoam applications in embankment project.



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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