



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) BAJO CARGA DE
COMPRESIÓN.**

T E S I S

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

**DOCTORA EN INGENIERÍA
(GEOTECNIA)**

QUE PRESENTA:

ALEXANDRA OSSA LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS
DR. MIGUEL P. ROMO ORGANISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, 2009





Universidad Nacional
Autónoma de México



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. DANIEL RESENDIZ NUÑEZ
Secretario: DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO
Vocal: DR. MIGUEL PEDRO ROMO ORGANISTA
1er. Suplente: DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY
2do. Suplente: DR. JUAN MANUEL MAYORAL VILLA

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL PEDRO ROMO ORGANISTA

FIRMA

*Agradezco el apoyo brindado en la realización de este
trabajo de investigación a:*

Dr. Miguel Romo

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT

Instituto de Ingeniería, UNAM

Dr. Osvaldo Flores

Dr. Ricardo Peralta

Javier Hernández

Orlando Palacios

Espumados de Estireno S.A

Poliol S.A de C.V

ÍNDICE

1	Introducción	1
1.2	Objetivos y Alcances	2
1.3	Aportaciones	3
2	Antecedentes	4
2.1	Aplicaciones geotécnicas del poliestireno expandido EPS	5
2.1.1	Material ligero para rellenos	5
2.1.2	Inclusión compresible	5
2.1.3	Control de vibraciones	6
2.1.4	Aislante térmico	7
2.2	El uso de los geosintéticos en la República Mexicana	7
3	Conceptos generales del poliestireno expandido EPS	11
3.1	Introducción	11
3.2	Proceso de fabricación del EPS	13
3.2.1	Pre-expansión	13
3.2.2	Reposo intermedio y estabilización	13
3.2.3	Expansión y moldeo final	14
3.3	Estructura de EPS	15
3.4	Propiedades físicas EPS	15
3.4.1	Densidad	15
3.4.2	Granulometría	17
3.4.3	Conductividad térmica	17
3.4.4	Permeabilidad y absorción	17
3.4.5	Estabilidad dimensional frente a la temperatura	20
3.4.6	Comportamiento frente a factores atmosféricos	20

3.4.7	Comportamiento frente al fuego	21
3.5	Propiedades químicas	21
3.6	Propiedades biológicas.	21
4	Comportamiento bajo esfuerzos de compresión estática	22
4.1	Introducción	22
4.2	Mecanismo de deformación por compresión del poliestireno expandido	22
4.3	Evaluación del comportamiento esfuerzo-deformación del EPS, mediante observaciones microscópicas.	25
4.4	Evaluación del comportamiento esfuerzo-deformación del EPS a nivel macroscópico.	31
4.4.1	Presentación de resultados	33
4.4.2	Análisis de resultados	38
4.4.2.1	Influencia de la densidad ρ	38
4.4.2.2	Influencia de la velocidad de desplazamiento $\dot{\delta}$	38
4.4.2.3	Influencia del esfuerzo de confinamiento σ_3	39
4.4.2.4	Comportamiento de la estructura interna del EPS	41
4.4.3	Círculos de Mohr	43
4.4.4	Trayectoria de esfuerzos	44
4.4.5	Superficie de fluencia	46
4.5	Modelo de comportamiento	47
4.5.1	Verificación del modelo	48
4.6	Efectos de esfuerzo sostenido (Creep)	55
4.6.1	Presentación de resultados	57
4.6.2	Análisis de resultados	57
5	Comportamiento bajo esfuerzos de compresión dinámica	60
5.1	Introducción	60
5.2	Evaluación del comportamiento dinámico del EPS	61
5.2.1	Pruebas de columna resonante	61
5.2.2	Pruebas triaxiales cíclicas	62

5.2.3	Presentación de resultados	63
5.2.4	Análisis de resultados	63
5.3	Modelo constitutivo tipo Masing	66
5.4	Efectos de carga repetida	67
5.4.1	Presentación de resultados	70
5.4.2	Análisis de resultados	72
6. Comentarios y conclusiones		74
Referencias bibliográficas		77

RESUMEN

En este trabajo se estudia el comportamiento mecánico del poliestireno expandido EPS bajo esfuerzos de compresión estáticos y dinámicos. Se evalúan los mecanismos de deformación por compresión del material a nivel microscópico mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido. El comportamiento compresivo a nivel macroscópico es evaluado mediante pruebas de laboratorio, las cuales fueron llevadas a cabo con el propósito de conocer la influencia que sobre este comportamiento ejercen la densidad, el esfuerzo de confinamiento y la velocidad de desplazamiento para el caso estático. El trabajo experimental de esta investigación se dividió en dos etapas: Evaluación del comportamiento estático y dinámico del EPS.

En la etapa de evaluación del comportamiento estático, se llevaron a cabo una serie de pruebas de compresión triaxial, en muestras de EPS de diferentes densidades bajo condiciones de velocidad de desplazamiento y confinamiento variables. Se analizó la relación que existe entre estos tres factores con la resistencia a la compresión del material. Con base en los resultados obtenidos se propuso un modelo bilineal que describe con buena aproximación el comportamiento a compresión del EPS bajo carga estática. Adicionalmente, en esta etapa fue evaluado el efecto de carga sostenida “creep” en el comportamiento del material.

En la etapa de evaluación del comportamiento dinámico, se llevaron a cabo pruebas triaxiales cíclicas a deformación controlada y de columna resonante a muestras de poliestireno expandido de diferentes densidades y sometidas a diferentes condiciones de confinamiento. Con base en los resultados obtenidos se construyen gráficas de la variación del módulo de rigidez al cortante G y amortiguamiento λ con la deformación angular γ , que describen el comportamiento dinámico del EPS y se analiza la influencia que sobre dicho comportamiento ejercen la densidad de la muestra y el esfuerzo de confinamiento. Además, con los resultados de las pruebas de laboratorio, se propone un modelo hiperbólico capaz de describir el comportamiento dinámico del material. Por otra parte, se llevaron a cabo pruebas triaxiales cíclicas a carga controlada con el propósito de medir la degradación de la rigidez del material con el número de ciclos aplicados en probetas de diferentes densidades sometidas a esfuerzos de confinamiento variables.

ABSTRACT

In this work the mechanical behavior of expanded polystyrene EPS is studied under static and dynamic load. Compressive deformation mechanisms of this material are evaluated at microscopic level using a scanning electron microscope. The macroscopic behavior of this material is evaluated by means of laboratory tests which were conducted to evaluate the influence of EPS density, confining stress, displacement rate (static case) on compressive behavior of EPS. Experimental work in this research is divided in two parts: Evaluation of static and dynamic behavior of EPS.

In order to evaluate the static behavior of EPS, undrained compression triaxial tests were conducted on EPS specimens with different densities and under varying confining stresses and deformation displacements conditions. The relationship between these three parameters and compression strength of this material was analyzed. Based on test results it was proposed a bilinear model which predicts accurately compression behavior of EPS under static loading. Also, in this research creep behavior of EPS was evaluated.

In order to evaluate the dynamic behavior of EPS, torsional resonant column and strain-controlled cyclic triaxial tests were carried out on EPS specimens with different densities and under varying confining stress conditions. From the laboratory test results, shear modulus G and damping ratio λ versus cyclic shear strain γ curves were obtained and a hyperbolic model was developed. By comparing laboratory test and analytical results, it is shown that this model reproduces accurately experimental data tested in this research. Additionally, the stiffness degradation of EPS with the number of applied cycles was evaluated carrying out stress-controlled cyclic triaxial test on EPS samples with different densities and varying confining stresses conditions.

1. Introducción

El poliestireno expandido EPS es un material celular liviano con una resistencia a la compresión similar a la de los suelos. Durante más de cuatro décadas este material ha sido usado en forma de bloques en la construcción de terraplenes principalmente aquellos cimentados sobre suelos compresibles. Su uso en la ingeniería geotécnica se extiende para la estabilización de taludes, la construcción de carreteras en forma acelerada, como aislante térmico y en la reducción de cargas laterales estáticas y dinámicas en estructuras de retención.

No obstante, pese a que en los últimos años el EPS ha sido objeto de numerosas investigaciones que han significado un gran avance en el estado del conocimiento de su comportamiento mecánico, la información disponible en la literatura de interés para el ingeniero geotécnico, continúa siendo limitada y en algunos aspectos escasa. Es por esto, que dentro de los criterios de selección que determinan la factibilidad del EPS como solución de problemas ingenieriles, continúan estando presente en algunos casos, la suposición de condiciones de resistencia obviando la naturaleza celular del material, la extrapolación de los resultados de experiencias previas y el uso de métodos de diseño simplificadorios en ausencia de modelos que describan el comportamiento del material de forma más aproximada.

Pese a lo anterior, la evaluación del comportamiento de los bloques de EPS ya sea mediante observación visual o a través de instrumentos ha demostrado que su desempeño a corto y largo plazo ha sido satisfactorio para un alto porcentaje de casos. Lo anterior, explica por qué el uso de este material como solución de problemas ingenieriles, ha ido creciendo cada vez más durante los últimos años, y sugiere que debemos prestar más atención a este tipo de nuevas tecnologías que son todavía emergentes en algunos países.

El interés en la realización de este trabajo de investigación surge de la necesidad de conocer y comprender algunos aspectos del comportamiento compresivo del EPS a nivel estático y dinámico que aún no han sido estudiados a profundidad, y cuyo entendimiento es importante porque proporciona herramientas para el análisis y el diseño seguro y óptimo de soluciones que involucren bloques de EPS, además de que puede propiciar la concepción de nuevas aplicaciones ingenieriles del EPS o materiales similares.

1.1 Objetivos y alcances

Con base en lo anterior, el objetivo principal de este trabajo de investigación es mejorar la comprensión del comportamiento mecánico del poliestireno expandido EPS bajo esfuerzos de compresión estáticos y dinámicos, y conocer la influencia que sobre este comportamiento ejercen la densidad del material y el esfuerzo de confinamiento, así como la velocidad de desplazamiento para el caso estático.

Para alcanzar este objetivo se realizaron las siguientes actividades:

- Investigación del proceso de fabricación del poliestireno expandible, y su relación con algunas de las propiedades físicas y mecánicas del material.
- Identificación y reconocimiento de la estructura interna del EPS, así como la determinación de los mecanismos de deformación de este material mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido modificado que incluye un marco de carga miniatura en el cual se realizaron pruebas de compresión simple.
- Ejecución de pruebas de compresión triaxial en muestras de poliestireno expandido (EPS) de diferentes densidades, bajo condiciones de velocidad de desplazamiento y confinamiento variables. Se analizó la relación que existe entre estos tres factores con la resistencia del material.
- Ejecución de pruebas triaxiales cíclicas a deformación controlada y de columna resonante en muestras de poliestireno expandido de diferentes densidades y sometidas a diferentes condiciones de confinamiento. Con base en los resultados obtenidos se construyen gráficas del módulo de rigidez al cortante G y amortiguamiento λ versus deformación angular γ , que describen el comportamiento dinámico del EPS, y se analiza la influencia que ejercen la densidad de la muestra y el esfuerzo de confinamiento al que es sometida, en las propiedades dinámicas del material.
- Ejecución de pruebas triaxiales cíclicas a carga constante con el propósito de medir la degradación de la rigidez del material con el número de ciclos aplicados.
- Formulación de modelos de comportamiento de predicción de las relaciones esfuerzo-deformación del EPS bajo condiciones estáticas, y de la variación del módulo de rigidez

al cortante G y el amortiguamiento λ , con la deformación angular γ , bajo las condiciones ensayadas.

- Evaluación de las características viscoplásticas del EPS mediante la realización de pruebas de compresión a esfuerzo sostenido (creep) en muestras de EPS de dos tipos de densidades bajo condiciones ambientales y bajo un estado de esfuerzos menor al esfuerzo de fluencia.

Queda fuera del alcance de esta investigación el desarrollo de pruebas de creep para diferentes condiciones de carga y temperatura, debido a que el tiempo requerido para obtener resultados concluyentes supera el periodo de tiempo establecido para esta investigación.

1.2 Aportaciones

El desarrollo de esta tesis aporta nueva información acerca del comportamiento a compresión del poliestireno expandido, ya que los resultados experimentales que se incluyen en este trabajo corresponden a los valores de densidades, esfuerzos de confinamiento y velocidades de desplazamiento no reportadas anteriormente en la literatura o si bien reportadas; lo están en forma limitada. Adicionalmente, en esta tesis se proponen dos modelos para la predicción del comportamiento estático y dinámico del poliestireno expandido, cuyos resultados son una buena aproximación de los resultados experimentales.

Tal vez la aportación más novedosa de este trabajo de investigación es la realización de pruebas de compresión no confinadas al interior de un microscopio electrónico lo cual permite evaluar y cuantificar el comportamiento esfuerzo deformación del material a nivel macroscópico y microscópico simultáneamente permitiéndonos entender algunas de las características mecánicas del material. Por otro lado, en esta investigación se presenta una hipótesis que al menos cualitativamente explica porqué el poliestireno expandido es un material cuya resistencia a la compresión disminuye en la medida que el esfuerzo de confinamiento aumenta.

Por último, esta investigación muestra que el poliestireno expandido para las densidades consideradas, no es un material totalmente impermeable como así lo indica gran parte de la literatura. La absorción de agua de este material depende del tiempo durante el cual esté sumergido y del estado de esfuerzos al que esté sometido.

2 Antecedentes

El poliestireno expandido EPS, es un material celular que pertenece al grupo de las geoespumas (Negusse, 1998). El término geoespuma o *geofom* fue propuesto por Horvath (1995) para describir a todo aquel material fabricado mediante un proceso de expansión que pueda usarse en aplicaciones geotécnicas.

El uso del poliestireno expandido EPS en forma de bloques no es reciente, países como Noruega, Estados Unidos, Japón, Malasia y Alemania entre otros, los han utilizado de manera exitosa en numerosas aplicaciones geotécnicas. De manera conjunta, Noruega y Japón representan aproximadamente el 80% del uso de bloques de EPS a nivel mundial. La primera aplicación geotécnica de los bloques de EPS ocurrió en Noruega en el año de 1972 mediante la construcción de terraplenes para vías cimentadas en suelos altamente compresibles. Sin embargo, en este país desde una década antes, los bloques de EPS ya eran utilizados como aislante térmico de la estructura del pavimento. En Japón los bloques de EPS están siendo utilizados de manera creciente en aplicaciones geotécnicas desde 1985, debido a las buenas experiencias obtenidas en el comportamiento del material bajo condiciones estáticas y dinámicas. En Alemania el uso de los bloques de EPS en aplicaciones geotécnicas se dio a mediados de los años 90 y unos pocos años antes en Malasia.

Por otro lado, en Estados Unidos el uso de esta tecnología data de finales de los años 80, y su uso ha aumentado notablemente en la última década, se destaca el desarrollo de proyectos que involucran grandes retos ingenieriles como es la rehabilitación de aproximadamente 27 kilómetros de la autopista interestatal I-15 en Salt Lake City situada sobre suelos altamente compresibles y la cual debería construirse en un periodo de tiempo corto. En este proyecto fueron utilizados un total de 100 mil metros cúbicos de EPS en la construcción de terraplenes para la ampliación de carriles y acceso a puentes, y en la construcción de respaldos compresibles en estribos de puentes.

Debido al creciente uso del poliestireno expandido en aplicaciones geotécnicas también ha ido aumentando el número de investigaciones acerca de sus propiedades y comportamiento. Estas investigaciones han incluido pruebas para la determinación de las propiedades mecánicas bajo

condiciones estáticas en laboratorio y el desarrollo de modelos de comportamiento (Negussey y Jahanandish, 1993; Horvath, 1995; Duškov, 1997a; Preber et al., 1994; Elragi et al., 1995; Zou and Leo, 1998; Chun et al., 2004; Atmatzidis et al., 2005; Wong y Leo, 2006, representación de su comportamiento bajo condiciones de carga estática y dinámica de algunos sistemas en escala real y en laboratorio (Duškov, 1997b; Sheeley y Negussey, 2000; Hazarika y Okuzono, 2004; Bathurst et al., 2007a y 2007b), simulación numérica y analítica de problemas geotécnicos como estructuras de retención y construcción de terraplenes (Aytekin, 1997; Duškov y Scarpas, 1997; Horvath, 1997; Murphy, 1997; Hazarika, 2006). No obstante, pese a que en los últimos años este material ha sido objeto de numerosas investigaciones, la información disponible acerca del comportamiento del EPS bajo condiciones dinámicas es muy limitada, (Hazarika y Okuzono, 2004; Athanasopoulos et al., 1999; Athanasopoulos et al., 2007; Duškov, 1997a; Leo, 2001). Así como también lo es la información acerca del comportamiento estático de este material bajo condiciones de velocidad de carga y confinamiento variables.

2.1 Aplicaciones geotécnicas del poliestireno expandido EPS

Una forma de clasificar las aplicaciones del EPS en la ingeniería geotécnica, es de acuerdo a la función que este material desempeña. Según Horvath (1995), el EPS puede ser utilizado como material de relleno ligero, inclusión compresible, control de vibraciones y aislante térmico. Algunas de estas aplicaciones se ilustran en la Figura 2.1.

2.1.1 Material ligero para rellenos

El poliestireno expandido EPS se caracteriza principalmente por ser un material liviano, su peso por metro cúbico es aproximadamente 100 veces menor al de un suelo, razón por la cual es utilizado como material de reemplazo en la construcción de terraplenes de vías y accesos a puentes donde la capacidad de carga y/o los asentamientos admisibles del suelo de cimentación son excedidos debido al peso del terraplén. Los bloques de EPS también se utilizan como reemplazo parcial o total de taludes y como material de respaldo en estructuras de retención tales como muros y estribos cuya estabilidad está comprometida debido al peso de la masa de suelo.

2.1.2 Inclusión compresible

La compresibilidad de los bloques de EPS puede variar de moderada a alta dependiendo de la densidad del material y de otros aspectos que intervienen en su comportamiento y que serán

tratados en capítulos posteriores. Esta característica ha sido aprovechada por los ingenieros geotecnistas en la construcción de cimentaciones profundas y estructuras de contención, ya que los empujes laterales transmitidos a estas estructuras pueden reducirse con la inclusión de bloques de EPS entre el suelo y la estructura de contención o cimentación, en estos casos los bloques actúan como un colchón deformable disipando un gran porcentaje del empuje transmitido por el propio peso del suelo, las sobrecargas que puedan existir y las fuerzas debidas a sismos. Bajo el mismo principio, los bloques de EPS también son utilizados como inclusión compresible en la construcción de cimentaciones superficiales apoyadas sobre suelos expansivos, y como protección de ductos de agua, gas y combustibles.

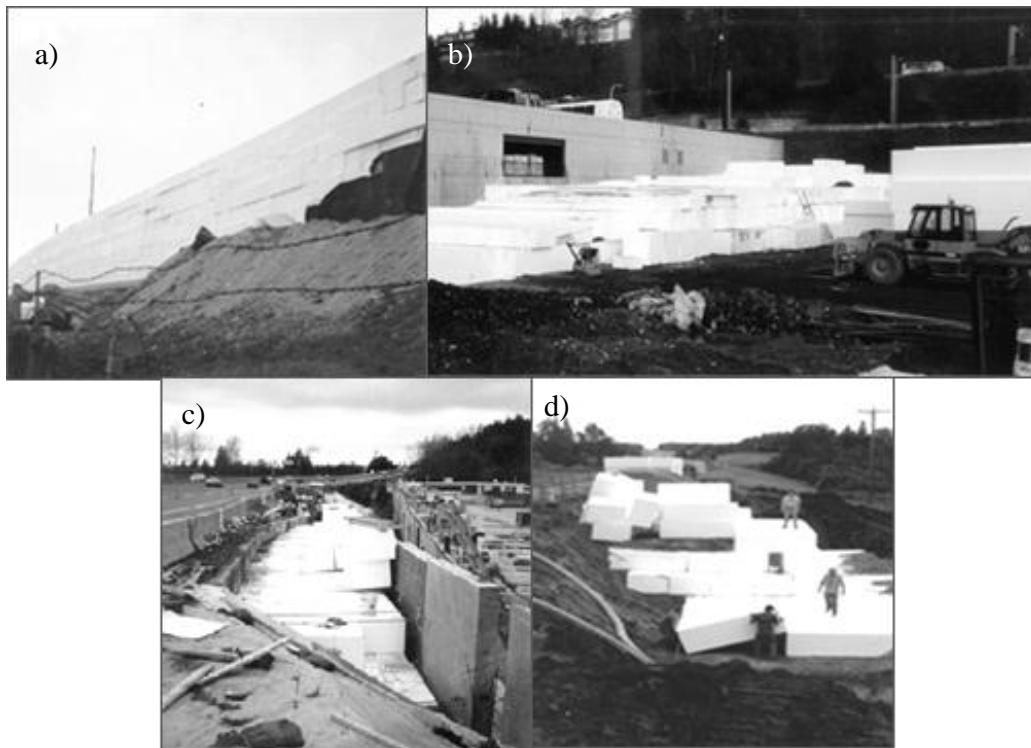


Figura 2.1 Algunas aplicaciones del EPS., a) Terraplén liviano, b) Rampa de acceso, c) Respaldo de una estructura de retención, d) estabilidad de taludes. (Tomado de Geofóam Research Center, <http://geofóam.syr.edu>)

2.1.3 Control de vibraciones

Los bloques de poliestireno expandido EPS resultan ser efectivos para el control de vibraciones de alta frecuencia y baja amplitud de deformación debido a sus características de amortiguamiento. Aunque esta aplicación no ha sido estudiada en forma detallada, se ha demostrado que la colocación de bloques de EPS al costado de vías o debajo de la estructura

del pavimento reduce de forma significativa las vibraciones ocasionadas por el paso de vehículos, ya que este material actúa como barrera atenuadora del movimiento.

2.1.4 Aislante térmico

El uso más antiguo que se le conoce al poliestireno expandido es el de aislante térmico, la colocación de bloques de EPS en la parte inferior de la estructura de un pavimento evita el congelamiento de sus capas, todo esto debido a que este material está constituido en su mayoría por aire, y a que posee una baja permeabilidad, lo cual impide que el agua a nivel de la subrasante migre hacia la parte superior de la estructura y posteriormente se congele.

2.2 El uso de los geosintéticos en la República Mexicana

Durante las últimas décadas el uso de los geosintéticos ha mostrado un incremento considerable a nivel mundial. Vale la pena recordar que esta práctica se originó como respuesta a la continua búsqueda de parte de los ingenieros por hallar soluciones alternativas a los materiales convencionales utilizados en construcción, que satisfagan todos los requerimientos del diseño procurando la calidad de vida y la seguridad de las personas.

Los ingenieros apoyados en disciplinas que anteriormente tenían muy poca o casi ninguna participación en el desarrollo de obras civiles, han logrado crear y continúan ideando la forma de fabricar materiales sintéticos con características de resistencia igual o superior a la de los materiales que la naturaleza provee y cuyas aplicaciones se extienden a diferentes áreas de la ingeniería.

En México el uso de los geosintéticos fue introducido en los años 70s, a la par que se hacía en el contexto mundial. Sin embargo, no fue sino hasta la década de los ochenta que esta práctica comenzó a ser desarrollada en forma notable por los ingenieros principalmente en las obras de infraestructura vial con el uso de geotextiles en la separación de capas, reparación y refuerzo de estructuras de pavimento, así como en la construcción de obras de drenaje.

A la fecha, son varios los proyectos realizados al interior de la república Mexicana en los que se usan los geosintéticos para diferentes aplicaciones ya sea como elementos de separación, refuerzo, filtración, drenaje y creación de barreras impermeables, entre otras. Estos productos no sólo representan una alternativa viable técnicamente sino también económicamente, ya que su utilización puede significar beneficios económicos a corto y/o a largo plazo.

Si bien el uso que se le da a los geosintéticos en nuestro país en cuanto a variedad de productos y aplicaciones es similar al de los países con mayor desarrollo, el número de proyectos en los que se utilizan estos materiales es moderado. Por otra parte, el conocimiento de las ventajas y desventajas del uso en las diferentes aplicaciones y la experiencia en el diseño e instalación de los diferentes productos geosintéticos entre los profesionales involucrados en el diseño, construcción y supervisión de los proyectos de ingeniería son pocos y se concentra en un pequeño pero creciente gremio de diseñadores y/o comercializadores de los materiales geosintéticos quienes han elevado sus esfuerzos la mayoría de veces de forma aislada por la difusión y promoción de la aplicación de esta práctica.

Si bien la mayoría de los productos geosintéticos utilizados en el país provienen de otras partes del mundo, en México se fabrican algunos de ellos como es el caso de los geotextiles, geomembranas, las geoceldas y los bloques de poliestireno expandido también conocidos como geobloques.

Debido al crecimiento e industrialización de las ciudades y municipios, y a la actividad minera al interior de la república mexicana, durante las dos últimas décadas ha crecido de forma exponencial la cantidad de desechos sólidos, industriales tóxicos y no tóxicos que deben depositarse de forma segura cuidando de no contaminar el suelo, el aire y el agua.

Simultáneamente, ha surgido un creciente interés en el uso los geosintéticos por parte de los profesionales relacionados con la protección del medio ambiente, debido a la durabilidad, resistencia al ataque de agentes químicos y biológicos, y a las características de impermeabilidad de estos materiales sintéticos, lo cual permite el desarrollo de proyectos sustentables. Tal es el caso de la geomembrana, en el país el uso de este producto se extiende también a aplicaciones agropecuarias y urbanísticas, y ocupa el primer lugar seguido por los geotextiles en los materiales sintéticos más utilizados.

Para el caso específico de los bloques de poliestireno expandido se puede decir que su uso en el país ha sido limitado, esto se debe en parte a malas experiencias presentadas en tiempos anteriores debido al uso de procesos constructivos inadecuados, lo cual ha generado algo de escepticismo entre los ingenieros diseñadores y constructores.

Otro factor importante que ha propiciado un uso moderado de este material es el elevado costo de un metro cúbico con respecto al de un material de relleno. Sin embargo, el criterio de selección de una alternativa de diseño no deberá estar basado sólo en este hecho, deberá hacerse de una forma global ya que cada problema geotécnico es diferente y su solución estará

supeditada a las condiciones climáticas, geológicas, geotécnicas, hidrológicas de la zona, a los tiempos de ejecución, entre otros, lo cual influirá en los costos directos del proyecto. Se debe tomar en cuenta, que los altos costos por metro cúbico del EPS pueden compensarse debido al uso de equipo ligero, a la facilidad de instalación de los bloques, a los cortos tiempos de ejecución los cuales no dependen de las condiciones climáticas, a la durabilidad y a los bajos costos de mano de obra. Si bien en décadas anteriores el transporte de los bloques de EPS era un factor que encarecía los costos directos del uso del este material para diferentes aplicaciones, en el año de 2002 México contaba aproximadamente con 104 plantas productoras de bloques EPS distribuidas en todo el territorio nacional tal como se muestra en la Figura 2.2.

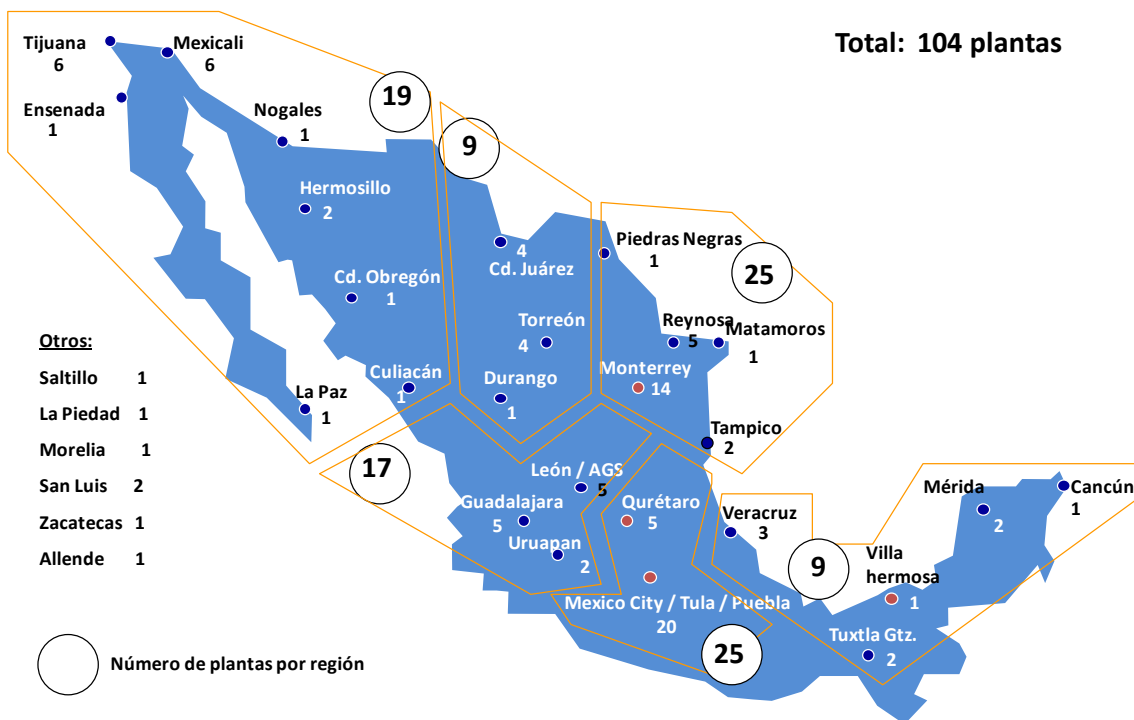


Figura 2.2 Distribución plantas de EPS para el año 2002 (VIII Styropor)

Además, debe de considerarse en la evaluación del proyecto otro aspecto que favorece la utilización de bloques de EPS, y es la prolongación de la vida útil de la obra lo que se traduce en una disminución de gastos por mantenimiento. Un claro ejemplo de ello es la construcción de carreteras sobre suelos compresibles en los cuales la colocación de bloques de EPS evitaría la utilización de terraplenes de precarga y/o la activación de procesos de consolidación debido al tráfico vehicular ocasionando asentamientos diferenciales lo cual afectaría las condiciones de servicio de la obra, cuya remediación normalmente consiste en la nivelación de la estructura

del pavimento, lo que induce a un círculo vicioso ya que el aumento de cargas generada por la nivelación recrudece los asentamientos.

La experiencia en el uso de los geosintéticos a nivel mundial nos ha enseñado que estos materiales funcionan de forma exitosa siempre y cuando todas las partes involucradas en el desarrollo del proyecto tengan conocimiento de las características y aplicaciones del mismo, se utilicen materiales fabricados bajo estrictos controles de calidad, y que las metodologías de diseño y la construcción se hagan bajo el apego a las respectivas normas.

Actualmente en México no existe una normatividad para la fabricación, diseño, instalación y construcción con geosintéticos. Por esta razón, los diseñadores y fabricantes se han tenido que apoyar en las normas vigentes en otros países. Por otro lado, el desconocimiento de la práctica y funcionamiento de los geosintéticos a nivel escolar y profesional ha ejercido un papel importante en la utilización moderada de estos materiales.

Es importante mencionar que en el país, instituciones de prestigio como lo son la Universidad Nacional Autónoma de México, el Instituto Politécnico Nacional, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) han llevado a cabo investigaciones orientadas a evaluar la efectividad y aplicabilidad de algunos materiales geosintéticos en la construcción de obras civiles y en menor grado otras orientadas a diagnosticar el comportamiento de algunas de las obras construidas, lo cual no es una práctica común en el país ya que no se asignan recursos económicos suficientes para financiar este tipo de proyectos.

Es claro entonces que el tema de los geosintéticos es un área de investigación en vías de desarrollo en México, en el futuro cercano se deberá trabajar en la unificación de procedimientos de diseño, instalación y control de calidad, como primer paso para la formulación y creación de una normatividad del uso de los materiales geosintéticos. Así como también se deberán realizar trabajos de análisis experimental del comportamiento de los mismos y evaluación del desempeño de las aplicaciones.

3 Conceptos generales del poliestireno expandido EPS

3.1 Introducción

Los sólidos celulares son materiales conformados por una serie de celdas unidas entre sí, formando arreglos bidimensionales llamados paneles de miel o arreglos tridimensionales llamados espumas (Gibson y Ashby, 1999). Existen materiales celulares de origen natural como la madera, el corcho, el coral, el hueso, las hojas y los tallos de algunas plantas. Por otro lado, existen materiales celulares no naturales que pueden fabricarse mediante polímeros, metales, cerámica, vidrio y otros compuestos, las formas de fabricaciones son numerosas pero las más comunes son la expansión, el moldeo y la extrusión de un material. Un ejemplo de materiales celulares artificiales son las espumas de poliuretano y poliestireno, pan horneado, barras de chocolate entre otros.

Las celdas de los materiales celulares están conformadas básicamente por dos elementos: los bordes y las caras. Se dice que una celda es abierta cuando su estructura sólo está formada por bordes, y es cerrada cuando su estructura la forman bordes y caras. (Figuras 3.1a y 3.2b).

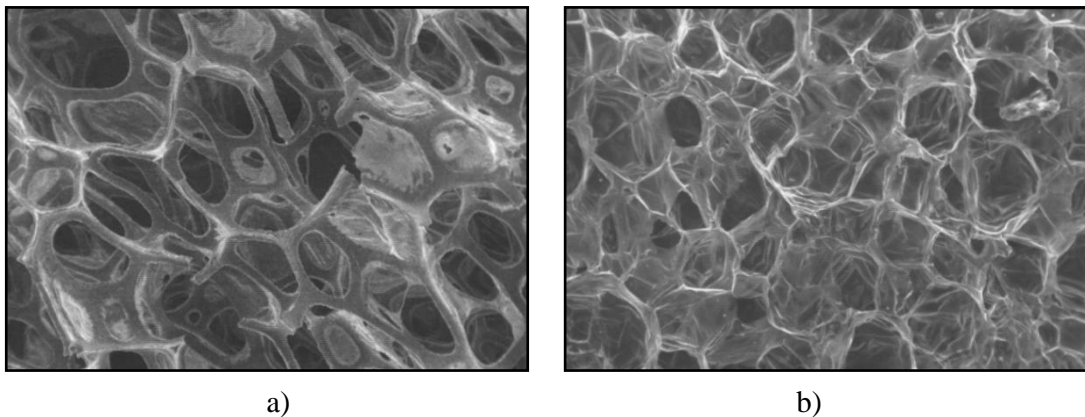


Figura 3.1 a) estructura celular abierta (poliuretano), b) estructura celular cerrada (poliestireno)

Los sólidos celulares tienen propiedades mecánicas que pueden ser cuantificadas de la misma manera como se hace con los sólidos convencionales. Las propiedades mecánicas de un sólido

celular difieren considerablemente con respecto a las propiedades del material a partir del cual fueron fabricados.

En términos generales los materiales celulares son porosos, livianos, altamente deformables, flexibles y poseen una baja conductividad térmica. Por lo anterior, existe una creciente demanda del uso de estos materiales para el desarrollo de nuevas tecnologías. No obstante, los materiales conformados por celdas de tipo abierto son más flexibles que aquellos conformados por celdas de tipo cerrado. Es por esto que algunas espumas con estructura celular cerrada son llamadas espumas rígidas. En la Figura 3.2 se presentan los rangos de variación de algunas de las propiedades más representativas de los sólidos celulares.

Los materiales celulares se usan en un gran número de aplicaciones en ingeniería, como aislante térmico dada su baja conductividad térmica, como embalaje ya que absorben grandes cantidades de energía, para sustentar estructuras flotantes debido a sus propiedades de flotabilidad y a que algunos de estos materiales no se ven afectados por el agua, como aislante acústico en el caso de materiales de tipo celda cerrada ya que el aire encapsulado en cada celda permite absorber el sonido, y como material filtrante. Su uso se extiende a la elaboración de materiales de construcción simples o compuestos con finalidades estructurales y/o térmicas, como parte del fuselaje de aviones, automóviles y barcos debido a su baja densidad y alta resistencia, como implantes óseos, materiales refractarios, entre otros.

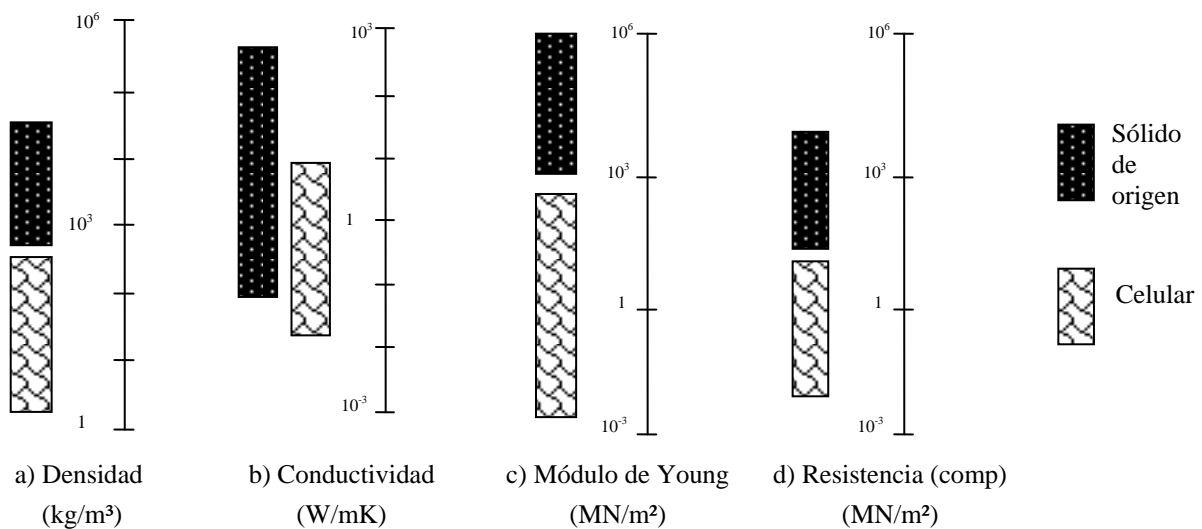


Figura 3.2 Rango de variación de algunas propiedades de los sólidos convencionales y celulares (Gibson, L. J. & Ashby, M. F. , 1999)

3.2 Proceso de fabricación del EPS

El poliestireno expandido EPS, se obtiene a partir de la transformación del poliestireno expandible el cual es un polímetro del estireno en forma de perlas o esferas con tamaños que varían de 0.2 a 3.0 mm. Las perlas de poliestireno expandible contienen un gas expansor que permite su transformación. El gas pentano es comúnmente usado como agente expansor debido a que posee un bajo punto de ebullición y no afecta la capa de ozono. Para obtener un bloque de poliestireno expandido es necesario someter a las perlas de poliestireno expandible a tres procesos que se describen a continuación y cuyo esquema se muestra en la Figura 3.3.

3.2.1 Pre-expansión

En esta etapa, las perlas de poliestireno expandible se agitan continuamente en depósitos llamados pre-expansores en presencia de vapor de agua a temperaturas entre 80 y 110°C aproximadamente. Como resultado se obtiene que el volumen de las perlas aumente hasta 50 veces con respecto a su volumen original. En esta etapa las perlas alcanzan el 95% aproximadamente de su tamaño final.

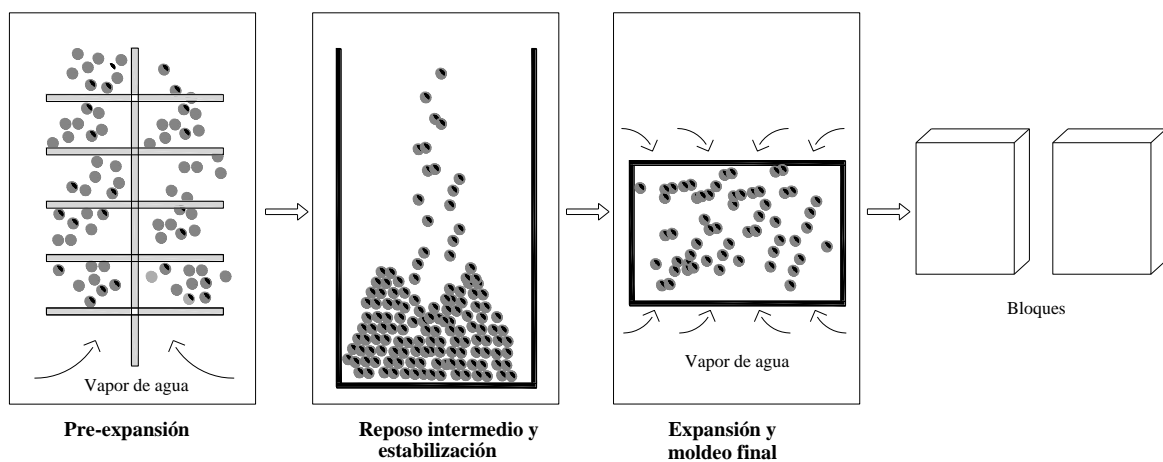


Figura 3.3 Proceso de fabricación del EPS

3.2.2 Reposo intermedio y estabilización

Al finalizar la etapa de pre-expansión, las perlas son enfriadas y secadas mediante corriente de aire ascendente. De esta forma, se logra una estabilización mecánica de las perlas las que posteriormente, son transportadas a silos de reposo.

Una vez que las perlas son transportadas a los silos de reposo, se les aplica aire por difusión para compensar las presiones de vacío generadas en el proceso de enfriamiento y secado hasta que estas presiones se equilibren con la presión atmosférica. En este proceso las perlas adquieren una mayor estabilidad mecánica y están listas para el proceso de expansión y moldeo final.

3.2.3 Expansión y moldeo final

En esta etapa las perlas pre-expandidas y estabilizadas se transportan a unos moldes o bloqueras cuya geometría depende del uso que vaya a dársele al producto final. Para el caso de aplicaciones geotécnicas el EPS se utiliza en bloques rectangulares de dimensiones variables. Posteriormente, se aplica vapor de agua logrando expandir las perlas nuevamente. Al estar confinadas en los moldes y por el efecto de la temperatura las perlas se fusionan entre sí formando un cuerpo sólido el cual puede someterse a procesos de corte y acabado según la aplicación en que vaya a ser utilizado. Al final del proceso de moldeo el gas pentano usado como agente expensor de las perlas se ha volatilizado casi en su totalidad; sin embargo, algunos fabricantes de EPS realizan un proceso de reposo adicional durante algunos días para garantizar su eliminación total.

La temperatura y tiempo de expansión son dos parámetros que deben ser estrictamente controlados durante el proceso de fabricación del EPS ya que estos intervienen en el comportamiento mecánico del material (Rossacci y Shivkumar, 2003).

En las Figuras 3.4 y 3.5 se presenta el poliestireno expandido EPS antes y después de ser pre-expandido y luego de ser moldeado durante su proceso de corte.

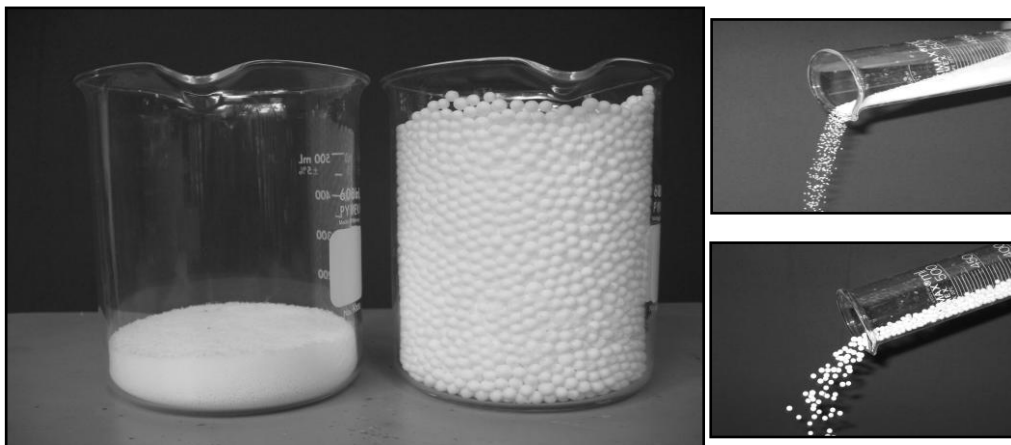


Figura 3.4 Pre-expansión antes y después.



Figura 3.5 Corte de un bloque de EPS

3.3 Estructura de EPS

El poliestireno expandido pertenece al grupo de las espumas celulares. A nivel macroscópico (Figuras 3.6a y 3.6b), la estructura del EPS consiste en perlas o esferas con diámetros que varían de 2 a 4 mm y que están apoyadas en sus tangentes y fusionadas entre sí (Figura 3.6c). A nivel microscópico (Figura 3.6d), cada perla de poliestireno expandido está constituida por una estructura celular tridimensional de tipo cerrado y de tamaño variable en la que se mantiene aire ocluido, lo cual da origen a un material liviano.

La distribución de esferas y celdas del poliestireno expandido es similar en todas las direcciones, por esto se considera que el material es estructuralmente isotrópico. Sin embargo, durante el proceso de moldeo de los bloques, las esferas cercanas a la superficie pueden sufrir deformaciones diferentes en cada dirección (Masso Moreu and Mills, 2004).

3.4 Propiedades físicas EPS

3.4.1 Densidad

Una de las principales propiedades del poliestireno expandido EPS es su baja densidad, esto se debe a que aproximadamente el 95% del volumen del este material es aire y el porcentaje restante es poliestireno. La densidad del EPS está determinada durante su proceso de fabricación por la temperatura y el tiempo de pre-expansión y expansión de las perlas. Así un bloque de EPS de baja densidad será sometido a un tiempo de expansión mayor que el que tendría un bloque de EPS con una densidad superior. La densidad de una perla de poliestireno

antes de ser sometida al proceso de fabricación de bloques de EPS es de 1050 kg/m^3 aproximadamente. Se conoce como densidad relativa a la relación que existe entre la densidad final del bloque terminado y la densidad de las perlas de poliestireno sin expandir.

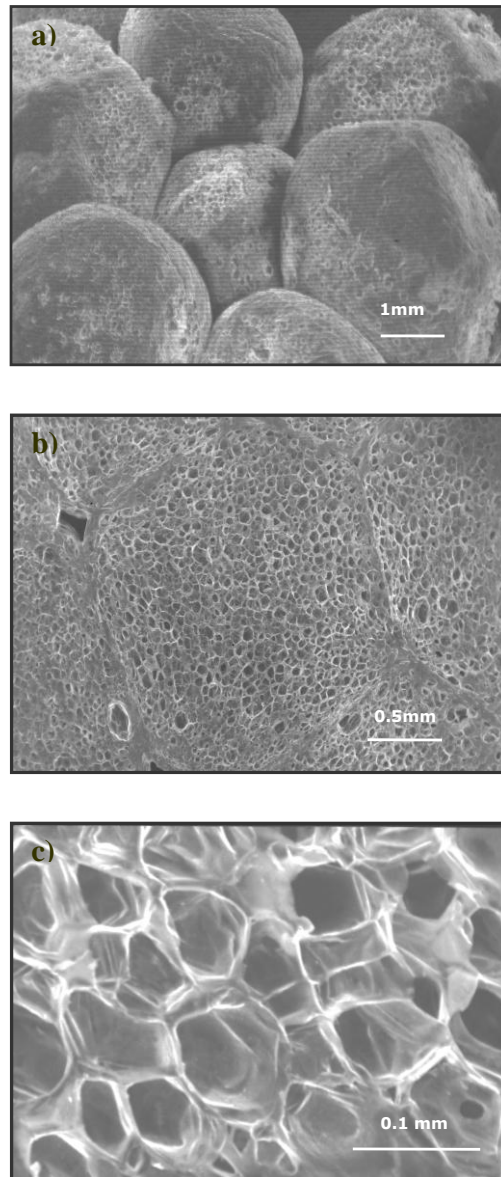


Figura 3.6 Estructura del EPS. a) Perlas, b) perlas y celdas, c) celdas

La distribución de densidades dentro de un bloque de EPS no es uniforme, son mayores los valores en las zonas que durante el proceso de fabricación estuvieron cerca de las paredes de los

moldes. La norma ASTM C 578-92 clasifica el EPS de acuerdo a su densidad de la siguiente manera.

Tabla 3.1 Clasificación del EPS de acuerdo a la norma ASTM C 578-92

Tipo	Densidad Nominal [kg/m³ (pcf)]	Densidad Mínima [kg/m³ (pcf)]
XI	12 (0.75)	12 (0.70)
I	16 (1.0)	15 (0.9)
VIII	20 (1.25)	18 (1.15)
II	24 (1.5)	22 (1.35)
IX	32 (2.0)	29 (1.8)

Estos valores de densidades son los comúnmente utilizados en las aplicaciones del EPS descritas anteriormente sin embargo, valores de densidades menores no son utilizados debido a que sus características de resistencia son tan bajos que incluso dificultan su manipulación y transporte.

3.4.2 Granulometría

El tamaño de las perlas de poliestireno expandido así como el de las celdas que las conforman, al igual que la densidad de los bloques de EPS dependen de la temperatura y el tiempo de fusión utilizados durante los procesos de pre-expansión y expansión. Las perlas al interior de un bloque de EPS con menor densidad tendrán mayor tamaño debido a que existe un mayor volumen de aire ocluido al interior de cada una de las celdas (Vaitkus et al., 2006).

3.4.3 Conductividad térmica

El poliestireno expandido EPS es un buen aislante térmico frente al calor y al frío, debido esencialmente al aire encapsulado dentro su estructura celular. La capacidad de aislamiento térmico de un material está definida por su coeficiente de conductividad térmica, que para el caso del EPS disminuye en la medida que aumenta el valor de la densidad del material.

3.4.4 Permeabilidad y absorción

Las membranas que conforman la estructura celular cerrada del poliestireno expandido no son permeables al agua en estado líquido. Cuando una muestra de EPS se sumerge en agua, los espacios libres entre las perlas tienden a ser ocupados por agua. Sin embargo, la

cantidad de agua absorbida por una muestra de poliestireno expandido es función del estado de esfuerzos al que el material se someta, así lo demuestran pruebas de laboratorio desarrolladas en este trabajo de investigación. En estas pruebas fueron medidos los volúmenes de absorción de agua de muestras de EPS de diferentes densidades y diámetros las cuales previamente fueron sumergidas durante un periodo de 10 semanas en el interior de una cámara triaxial llena de agua. El programa de pruebas se dividió en dos series, en la primera de ellas no se aplicó confinamiento a las muestras y en la segunda fue aplicado un confinamiento de 60 kPa y se tomaron lecturas de absorción de agua cada dos semanas. La altura h de las muestras fue de aproximadamente 10 cm y sus diámetros ϕ_1 y ϕ_2 fueron 6.5 y 3.6 cm. En la Tabla 3.2 se presenta un resumen de las pruebas realizadas.

Tabla 3.2 Resumen pruebas de absorción

Pruebas	ρ inicial (kg/m³)	ϕ (cm)	h (cm)	Confinamiento (kPa)	Absorción* (%)
M4	28.70	6.5	10.5	0	6.29
M5	19.00	6.5	10.0	0	4.15
M6	30.30	3.6	10.0	0	5.46
M7	29.85	6.5	10.5	60	17.42
M8	30.46	3.6	10.0	60	15.33
M9	19.60	6.5	10.15	60	12.86
M10	20.83	3.6	10.0	60	14.34

* Semana 10

Tal como se observa en la Figura 3.7, los resultados obtenidos de las pruebas M4, M5 y M6 indican que cuando la muestra se encuentra sometida a un estado de esfuerzos de confinamiento mínimo, el porcentaje de agua absorbida es realmente bajo, 6 y 4% para densidades de 30 kg/m³ y 20 kg/m³ respectivamente. Estos resultados son similares en orden de magnitud a los obtenidos mediante pruebas de absorción a largo plazo realizadas por Duškov (1997a) para densidades de 15 y 20 kg/m³, en las cuales no fue aplicado confinamiento a la muestra. Sin embargo, los resultados de las pruebas de las pruebas M7, M8, M9 y M10 indican que cuando las muestras de EPS se encuentran bajo esfuerzos de confinamiento de 60 kPa, los porcentajes de absorción son mayores del orden del 16% y 13% para densidades de 30 kg/m³ y 20 kg/m³ respectivamente. En esta Figura se observa además, que para la condición confinada, la cantidad de agua absorbida con el tiempo presenta un comportamiento asintótico.

Los resultados de las pruebas de absorción permiten suponer que el confinamiento ocasiona un debilitamiento y/o rompimiento de las ligas entre las esferas de esta forma la cantidad de agua que fluye al interior de la probeta es mayor, por lo tanto el material se vuelve más permeable.

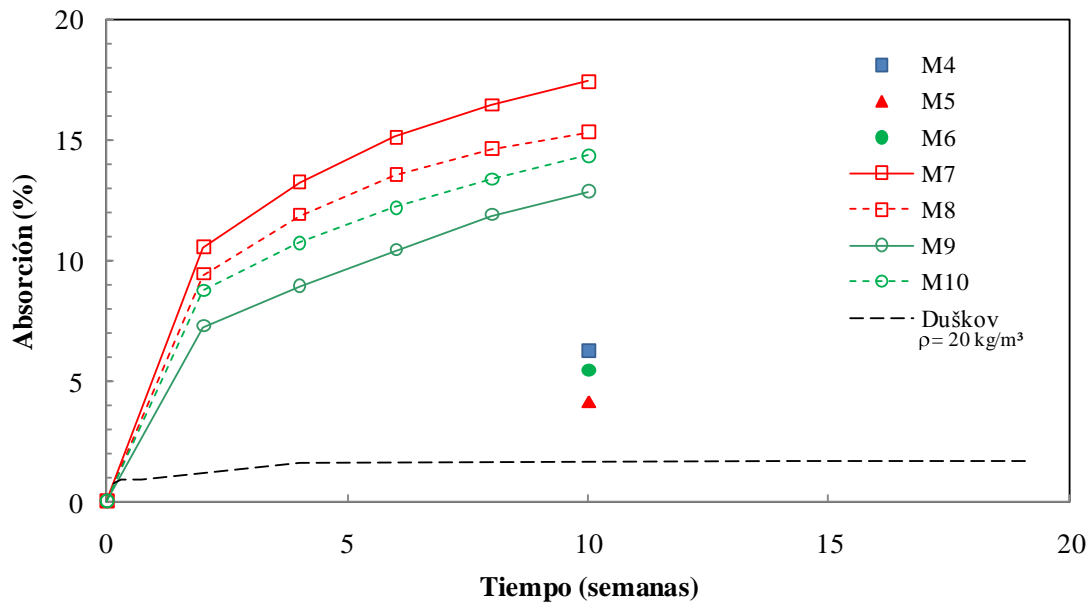


Figura 3.7 Pruebas de absorción

Adicionalmente, en la Figura 3.7 se puede observar que el porcentaje de absorción de agua de las muestras de EPS disminuye en la medida que decrece la densidad del material. De acuerdo a la información suministrada por el fabricante del material, ambas densidades fueron fabricadas a partir de un mismo tamaño de perla (sin expandir) pero durante el proceso de expansión las perlas destinadas a formar los bloques de densidad de 20 kg/m^3 adquirieron un mayor tamaño que las perlas expandidas destinadas a formar bloques de densidad 30 kg/m^3 . Lo anterior, debido a que estas últimas fueron sometidas a un tiempo de expansión menor. Observaciones microscópicas permitieron determinar que una vez que las perlas han sido fusionadas entre sí, en la medida que aumenta el tamaño de la perla expandida mayor es la relación entre la superficie de contacto entre perlas y el diámetro de ellas, lo cual sugiere que un material de densidad menor es susceptible a absorber menos agua que un material de densidad mayor.

Una vez finalizadas todas las pruebas de absorción algunas de las muestras utilizadas en estas pruebas, fueron sumergidas en una sustancia contrastante y luego de un periodo de 24 horas fueron cortadas en diferentes secciones con el fin de observar la distribución de espacios ocupados por la sustancia, tal como se muestra en la Figura 3.8. En esta Figura se nota que pese a que los porcentajes de absorción obtenidos en muestras no confinadas son menores a los obtenidos en muestras confinadas, en ambos casos el agua logró migrar hacia el centro de la probeta.

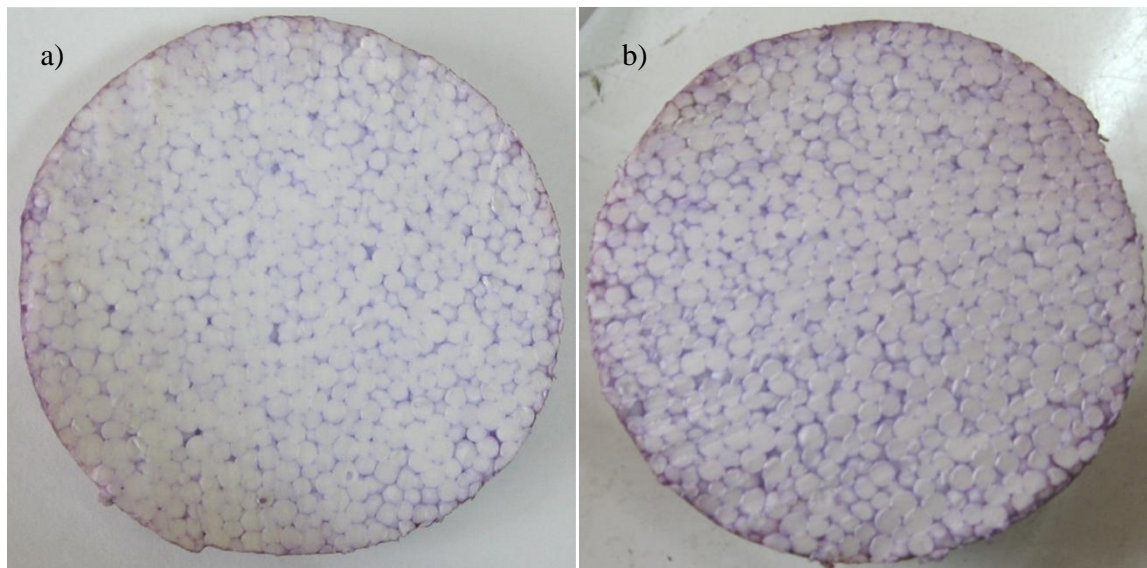


Figura 3.8 Absorción de agua a) Muestra no confinada b) Muestra confinada

3.4.5 Estabilidad dimensional frente a la temperatura

El poliestireno expandido puede ser utilizado a temperaturas menores a 80°C sin que se presenten variaciones dimensionales del mismo. Sin embargo, para temperaturas superiores el material presenta por cada grado centígrado variaciones entre 0.05mm a 0.07mm por metro de longitud. Esta variación no depende de la densidad del EPS. La variación dimensional por aumento de temperatura es reversible. Valores bajos de temperatura no afectan la estabilidad dimensional del EPS.

3.4.6 Comportamiento frente a factores atmosféricos

La radiación ultravioleta prolongada influye en el comportamiento del EPS, tornándolo amarillento y convirtiéndolo en un material frágil, susceptible a la erosión por viento y lluvia.

Estos efectos adversos pueden prevenirse protegiendo el EPS mediante recubrimientos con pinturas, concreto o geotextiles.

3.4.7 Comportamiento frente al fuego

El 95% aproximadamente de aire contenido en el volumen del EPS lo califica como un material de carga combustible despreciable. Para todas las aplicaciones en construcción se le debe incorporar al EPS un ignífugo que lo hace autoextinguible, es decir, no propagador de llama.

El comportamiento mecánico del EPS es un aspecto relevante dentro de las propiedades físicas del material y por lo tanto será discutido de forma individual en capítulos posteriores.

3.5 Propiedades químicas

En cuanto a las propiedades químicas del EPS, éste no se destruye con la acción prolongada de sustancias como solución salina, jabones, lejías ácidos diluidos, alcoholes, y soluciones alcalinas. Por otro lado, el EPS se disuelve con la acción de ácidos concentrados, disolventes orgánicos, aceites, diesel y carburantes.

3.6 Propiedades biológicas

El EPS no representa un medio adecuado para la proliferación de hongos, parásitos y bacterias de putrefacción. No es alimento de roedores, ni de insectos. Además, es inodoro, reciclable, no tóxico y no contiene compuestos como clorofluoro- carbonado y no daña la capa de ozono. Al no ser un producto biodegradable, mantiene su inalterabilidad en el tiempo, lo que le permite una larga vida útil.

4 Comportamiento bajo esfuerzos de compresión estática

4.1 Introducción

El poliestireno expandido EPS es un material utilizado en diferentes aplicaciones en ingeniería dada su baja densidad y la capacidad que tiene de absorber cantidades considerables de energía transmitida por fuerzas externas. Ante la aplicación de una fuerza de compresión el poliestireno expandido reacciona experimentando grandes deformaciones, la energía absorbida debido a esta fuerza se disipa a través de la flexión y/o pandeo y rompimiento de las paredes de poliestireno de las celdas que conforman la estructura celular cerrada, y por la compresión y expulsión del aire ocluido al interior de cada celda. En materiales celulares se define como pandeo a la ondulación que presentan los bordes y las caras de la estructura celular cuando éstas son sometidas a esfuerzos de compresión axial (Gibson y Ashby, 1999).

4.2 Mecanismo de deformación por compresión del poliestireno expandido

La curva esfuerzo deformación de los materiales celulares tales como el poliestireno expandido se puede dividir en 3 zonas tal como se muestra en la Figura 4.1. En la primera zona, las celdas cerradas que conforman la estructura del EPS presentan un comportamiento elástico lineal que satisface la ley de Hooke, por lo general en esta etapa las deformaciones no sobrepasan al 1% ó 2% dependiendo principalmente de la densidad del material.

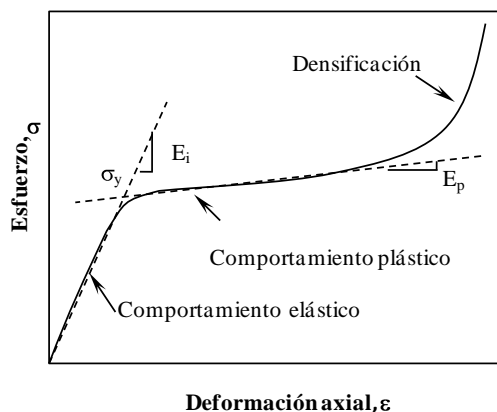


Figura 4.1 Comportamiento esfuerzo deformación del poliestireno expandido (EPS)

La energía absorbida por el poliestireno expandido cuando se encuentra dentro del rango de comportamiento elástico, se disipa mediante la flexión y en ocasiones pandeo de los elementos que conforman cada una de las celdas, y por la compresión del aire atrapado dentro de la estructura celular de tal forma que cuando se efectúa un proceso de descarga del material, las deformaciones generadas se revertirán hasta igualar el estado inicial de esfuerzos.

El comportamiento elástico de este material se puede describir en función del módulo tangente inicial E_i definido como la pendiente de la curva en este tramo, y la relación de Poisson ν . La relación de Poisson del EPS es menor que la de un suelo y de acuerdo al estado de esfuerzos y la densidad del material puede alcanzar valores cercanos o iguales a cero. Varias expresiones se han propuesto para la estimación de la relación de Poisson y el módulo tangente inicial del EPS (Horvath, 1995; Preber et al., 1994).

En la segunda zona de la curva esfuerzo deformación del EPS, el material presenta un comportamiento plástico cuyo inicio está definido por el esfuerzo de fluencia σ_y , tal como se muestra en la Figura 4.1. Esta zona se extiende ampliamente hasta valores de deformaciones cercanas al 70%, presenta una pendiente E_p definida como módulo de plasticidad, esta zona se caracteriza porque en ella ocurre el colapso de la estructura celular cerrada, las paredes de las celdas se flexionan ocurriendo en la mayoría de los casos pandeo. El aire atrapado al comienzo se comprime y luego empieza a traspasar las paredes de poliestireno, finalmente ocurre el rompimiento de algunas de las paredes de las celdas dando inicio al colapso de la estructura. En esta etapa las deformaciones son de carácter irreversible, se nota una pérdida apreciable del volumen de la muestra.

Una vez que la estructura celular cerrada colapsa debido a la aplicación de esfuerzos de compresión, el material continúa disipando energía pero esta vez a través de la expulsión del aire remanente en las celdas y mediante el reacomodo en forma de capas y deformación de la estructura celular colapsada. Esta zona de la curva esfuerzo-deformación es conocida como zona de densificación y hace referencia a que la estructura interna del material cambia en su totalidad y pasa de ser celular a prácticamente sólida. En la zona de densificación se presentan deformaciones mayores al 70%, es claramente visible la pérdida de volumen del material sin embargo, las deformaciones laterales son pocas y en algunos casos imperceptibles, tal como se ilustra en la Figura 4.2.

Debido a que la orientación de las paredes de las celdas es variable, y aunque los fenómenos que predominan en la aplicación de cargas por compresión son la flexión y el pandeo de los

elementos (membranas) que conforman la celda, también se genera tensión y esfuerzos cortantes en dichos elementos, lo cual hace que el mecanismo de deformación de una muestra de poliestireno expandido sometida a cargas de compresión sea un fenómeno complejo de representar matemáticamente. Cuanto más uniforme es la distribución y forma de las celdas de los materiales llamados sólidos celulares, más simple es su modelación matemática.

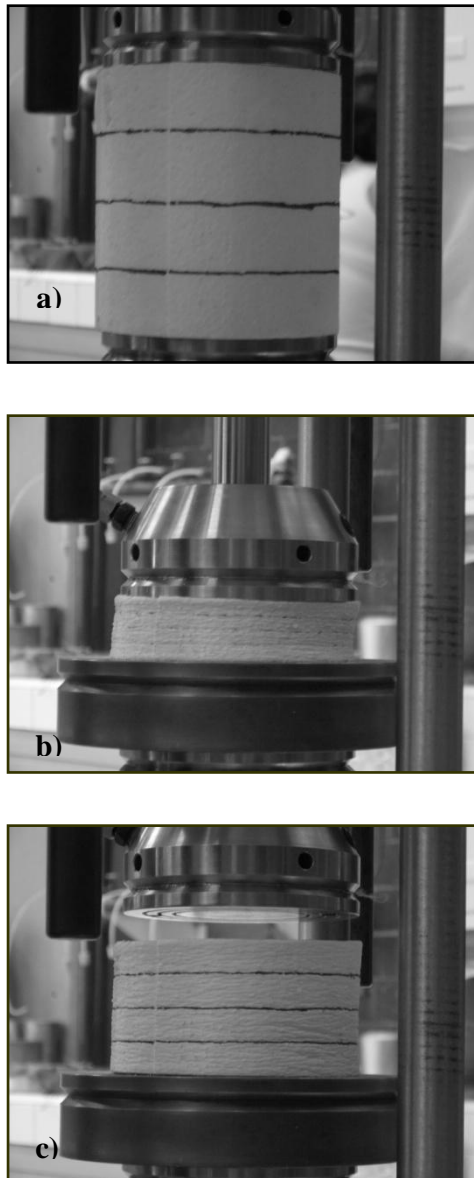


Figura 4.2 Deformaciones axiales y laterales en una probeta de EPS. a) Estado inicial sin carga b) Deformaciones axiales del orden del 70%, c) Proceso de descarga de la probeta.

4.3 Evaluación del comportamiento esfuerzo-deformación del EPS, mediante observaciones microscópicas.

El estado actual del conocimiento de las propiedades mecánicas del poliestireno expandido se ha derivado de la realización de pruebas de laboratorio a nivel macroscópico bajo condiciones estáticas y dinámicas sobre muestras de este material, y del estudio del comportamiento y características de los materiales celulares.

Desde el punto de vista de la ingeniería geotécnica la mayoría de las investigaciones que se han realizado hasta el momento, se han enfocado en el comportamiento macroscópico del material. Avances significativos en el conocimiento, determinación de propiedades bajo condiciones estáticas y dinámicas, así como de las características viscoplásticas del material se han documentado durante las últimas cuatro décadas, lo que ha representado un crecimiento a nivel mundial en el uso del poliestireno expandido en aplicaciones geotécnicas. Sin embargo, de estas investigaciones se han planteado también algunos interrogantes acerca del comportamiento de dicho material que no han sido resueltos aún en su totalidad.

Pese a que se tiene conciencia de que el EPS no es un sólido continuo hay una gran tendencia a tratarlo como tal, con la idea de simplificar el análisis de su comportamiento mecánico. Por lo anterior, se debe incorporar el análisis del comportamiento de la estructura interna del EPS en la determinación de sus propiedades mecánicas y demás, utilizando herramientas tales como la microscopía para lograr una mejor comprensión sobre varios aspectos del comportamiento de los materiales y relacionarlos con la ocurrencia de algunos fenómenos a nivel macroscópico.

Con el propósito de mejorar el estado del conocimiento fenomenológico del comportamiento mecánico del poliestireno expandido bajo compresión, tal como se muestra en la Figura 4.3 se adaptó un marco de carga (Peralta et al., 1980; Peralta, 1984) al interior de un microscopio electrónico de barrido marca JEOL JSM 35C, en el cual se realizaron pruebas de compresión simple en muestras de EPS cúbicas de 4 mm de lado con una densidad de 26 kg/m³.

Los resultados obtenidos permitieron valorar y cuantificar paso a paso el comportamiento esfuerzo-deformación de varias muestras de EPS, así como observar a nivel macroscópico y microscópico en forma simultánea el mecanismo de deformación del material. Cada una de las probetas fue llevada progresivamente a un nivel de deformación de aproximadamente 60%.

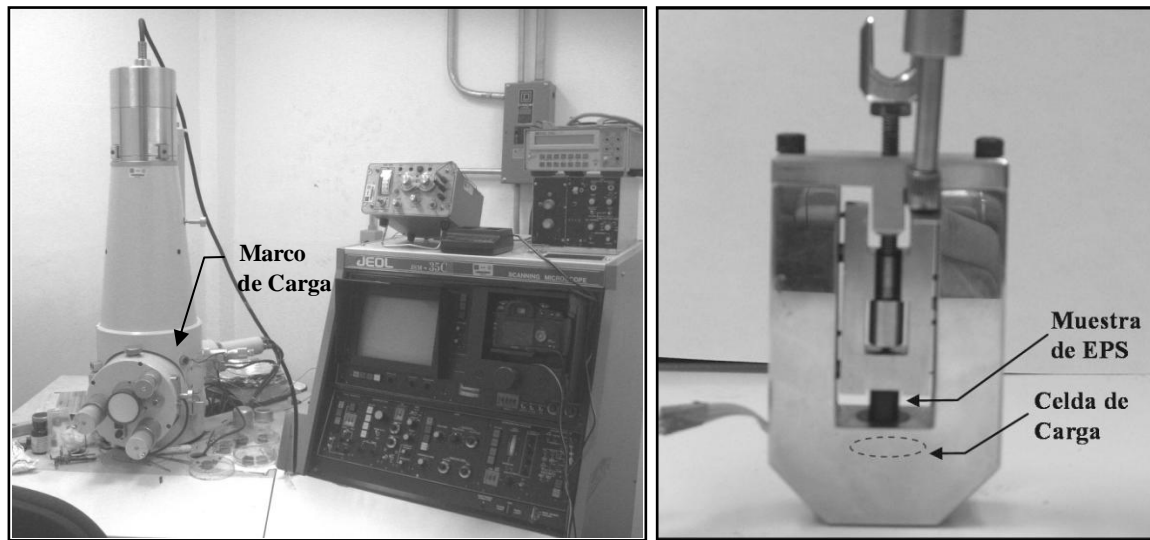


Figura 4.3 a) Microscopio electrónico b) Marco de carga

En la Figura 4.4 se muestran los resultados de una prueba de compresión simple realizada a una muestra de EPS de 26 kg/m^3 de densidad, esta prueba se llevó a cabo en el marco de carga instalado al interior del microscopio electrónico. En las Figuras 4.6 a 4.11 se muestra una secuencia fotográfica tomada a 15 y 100 ampliificaciones de dicha prueba, en la serie de fotos tomada a 100 ampliificaciones, se establecieron 3 puntos de control con el fin de darle seguimiento a la evolución de la estructura celular. Durante el proceso de carga de la muestra de EPS, se notaron algunos aspectos que se describen a continuación:

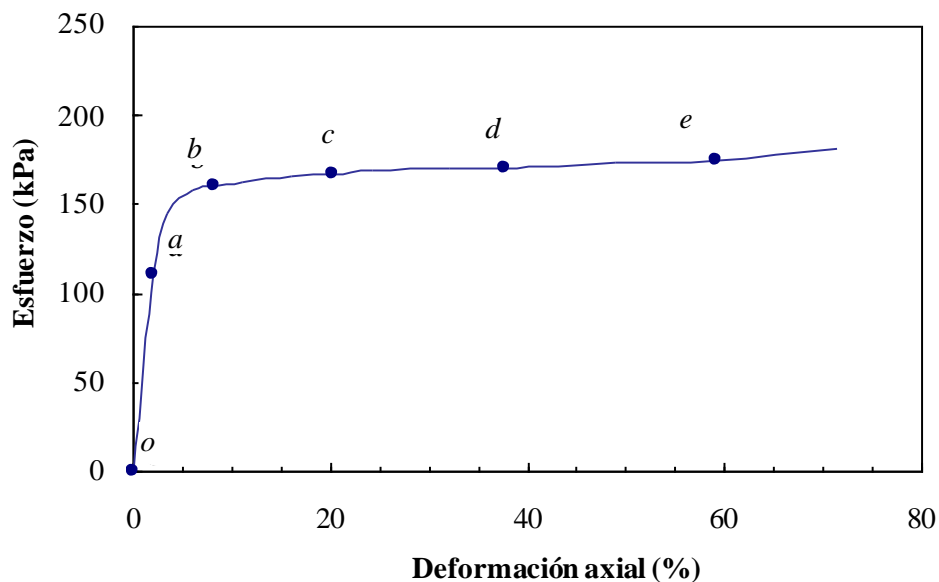


Figura 4.4 Evolución de las deformaciones en una muestra de EPS de 26 kg/m^3

En las Figuras 4.6a y 4.6b se observa la muestra de EPS sometida a un nivel de esfuerzos dentro del rango elástico del comportamiento que corresponde a una deformación del orden del 2.5% (punto *a* de la Figura 4.4). En la Figura 4.6b se nota que la estructura celular permanece casi intacta con respecto a la condición inicial de cero esfuerzo (Figura 4.5b); sin embargo, se aprecia una reducción del espacio entre perlas (Figura 4.6a), lo que sugiere que además de la compresión del aire de las celdas, el reacomodo de las perlas también contribuye en la deformación de la muestra para este rango de esfuerzos.

En la Figura 4.7b se nota que los elementos de la estructura celular experimentan los fenómenos de flexión, tensión y por lo tanto algunas celdas sufren estrechamiento y/o alargamiento de sus secciones debido a la aplicación de los esfuerzos de compresión. En esta figura también se puede observar que la celda identificada con el punto 1 prácticamente permanece igual a la condición inicial de la prueba, mientras que las celdas identificadas con los puntos 2 y 3 se muestran comprimidas verticalmente. A nivel macroscópico en la Figura 4.7a se aprecia una disminución del espacio entre perlas. El estado de esfuerzos de las Figuras 4.7a y 4.7b, sugiere que las deformaciones, en este caso del orden del 8% (punto *b* Figura 4.4), son de carácter irreversible pues se ha sobrepasado el esfuerzo de fluencia.

Las Figuras 4.8a y 4.8b corresponden al estado de esfuerzos para el cual la muestra presenta una deformación del 20% aproximadamente (punto *c* de la Figura 4.4), en estas dos figuras se observa que la forma de las perlas y el arreglo de las celdas han cambiado significativamente con respecto a su configuración inicial. Se aprecia que las perlas se han deformado de tal forma, que prácticamente ha desaparecido el espacio entre ellas. Adicionalmente, tal como se puede ver en los puntos de control 1 a 3, la estructura de las celdas prácticamente ha colapsado, expulsando casi en su totalidad el aire que tenía ocluido en su interior.

El comportamiento fenomenológico observado en las Figuras 4.8a y 4.8b se percibe de forma acentuada en las Figuras 4.9a y 4.9b, cuyo estado de esfuerzos corresponde al punto *d* en la Figura 4.4 y representa un 39% de deformación axial. Para dicho nivel de deformaciones la estructura celular de la muestra está tan modificada que no es posible identificar la ubicación de los puntos de control 2 y 3.

En las Figuras 4.10a y 4.10b se observa la muestra de EPS sometida a un estado de esfuerzos tal, que las deformaciones alcanzan un 60% aproximadamente (punto *e* de la Figura 4.4). En la Figura 4.10b se aprecia cómo los elementos que en un principio conformaban la estructura celular cerrada, ahora presentan un arreglo muy diferente el cual en varias zonas simula la agrupación casi horizontal de varias capas de poliestireno. A nivel macroscópico tal como se

observa en la Figura 4.10a resulta difícil distinguir los contornos de las perlas que conforman la muestra. Todo lo anterior sugiere que la muestra de EPS está iniciando o está muy cerca de iniciar el proceso de densificación descrito en el numeral 4.2.

Tal como se observa en las Figuras 4.11a y 4.11b, al realizar la descarga de la muestra de EPS, ésta recuperó aproximadamente un 50% de su altura inicial no obstante, se nota un daño importante en la estructura del material, un gran porcentaje de las celdas que anteriormente estaban llenas de aire se destruyeron y en menor grado otras todavía conservan aire ocluido en su interior, esto sugiere que el proceso de densificación de la muestra sólo había iniciado en algunas zonas. En estas dos figuras se observa la aparición de una grieta que se propaga de forma horizontal dentro de la estructura celular y continúa descendiendo por una línea que coincide con la unión entre dos perlas de EPS, lo cual es producto de la generación de esfuerzos cortantes al interior de la muestra.

En la serie de fotografías tomada a 15 ampliaciones del tamaño original de la muestra se puede observar que durante todo el proceso de carga de la muestra de EPS incluso en la descarga, las deformaciones laterales que presenta la muestra son muy pequeñas, casi imperceptibles, lo cual es consistente con los conceptos reportados en la literatura y en numerales posteriores de este documento, los cuales expresan que el poliestireno expandido EPS posee relaciones de Poisson muy pequeñas o cercanas a cero. Esta serie fotográfica sometido a un proceso de carga de compresión como sí lo hacen los suelos y otros materiales por lo tanto, el diseñador es quien debe establecer el criterio de falla con base en los requerimientos del proyecto.

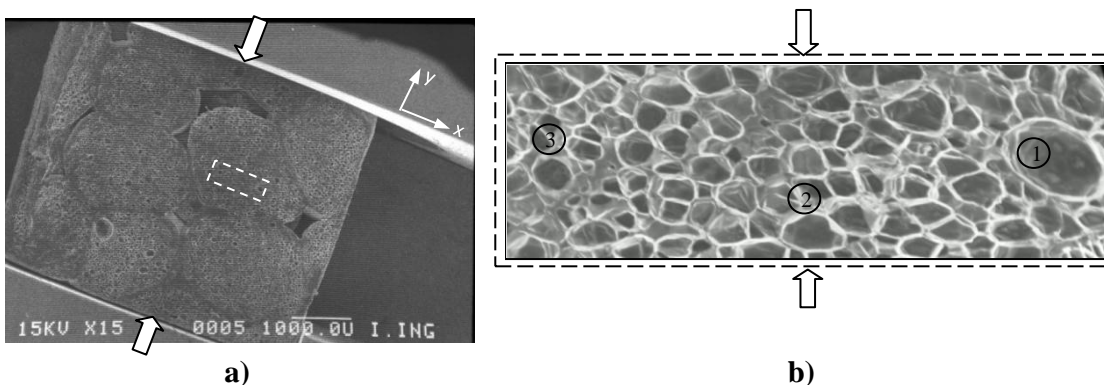


Figura 4.5 Estructura interna del EPS al 0% de deformación axial a) 15 ampliaciones, b) 100 ampliaciones.

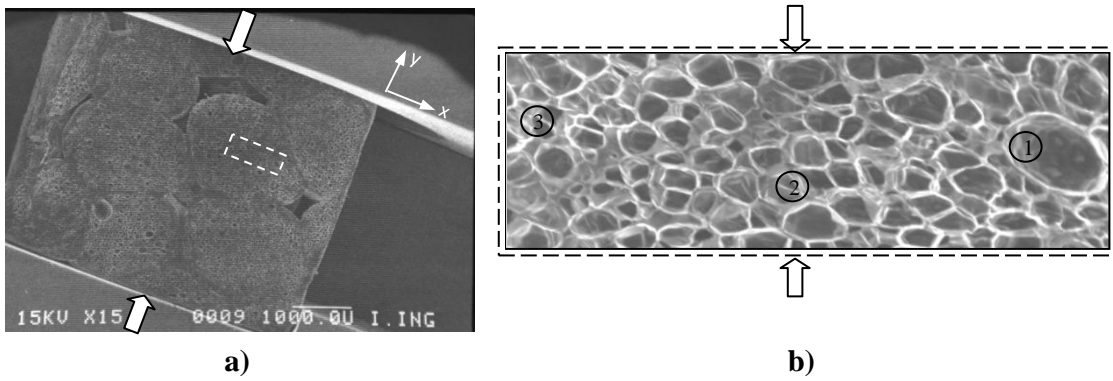


Figura 4.6 Estructura interna del EPS al 2.5% de deformación axial a) 15 ampliaciones, b) 100 ampliaciones.

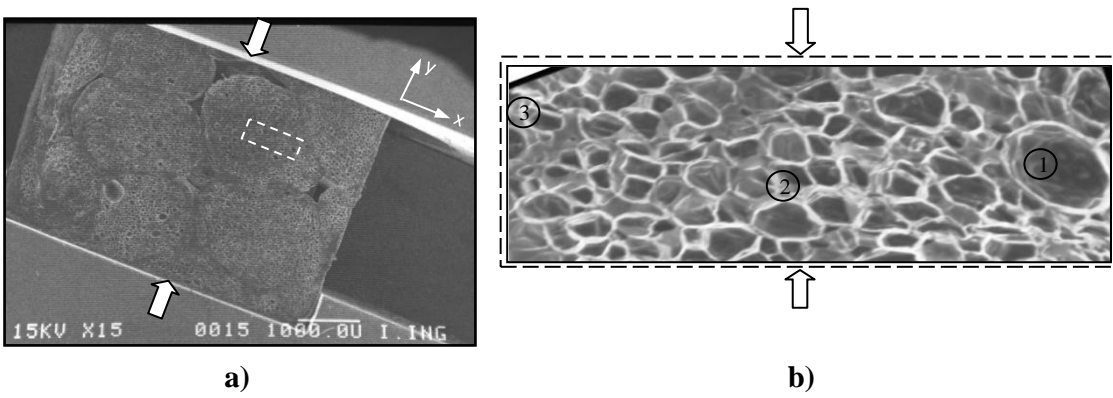


Figura 4.7 Estructura interna del EPS al 8% de deformación axial a) 15 ampliaciones, b) 100 ampliaciones.

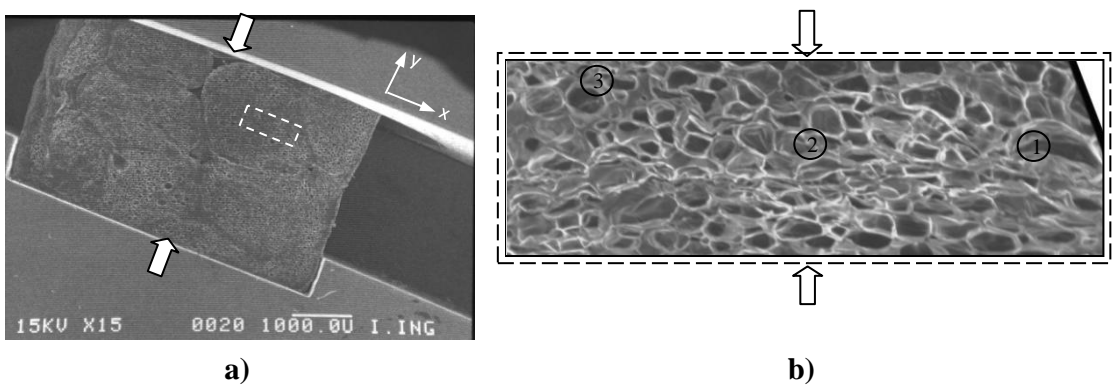


Figura 4.8 Estructura interna del EPS al 20% de deformación axial a) 15 ampliaciones, b) 100 ampliaciones.

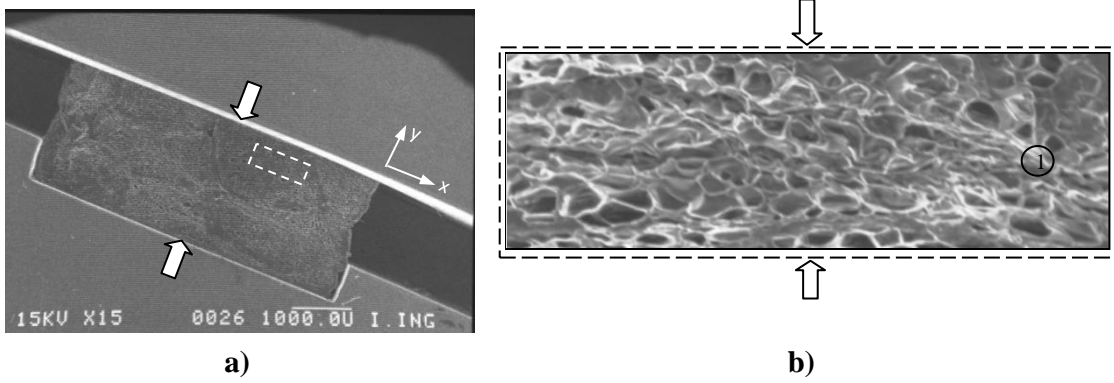


Figura 4.9 Estructura interna del EPS al 39% de deformación axial a) 15 ampliaciones, b) 100 ampliaciones.

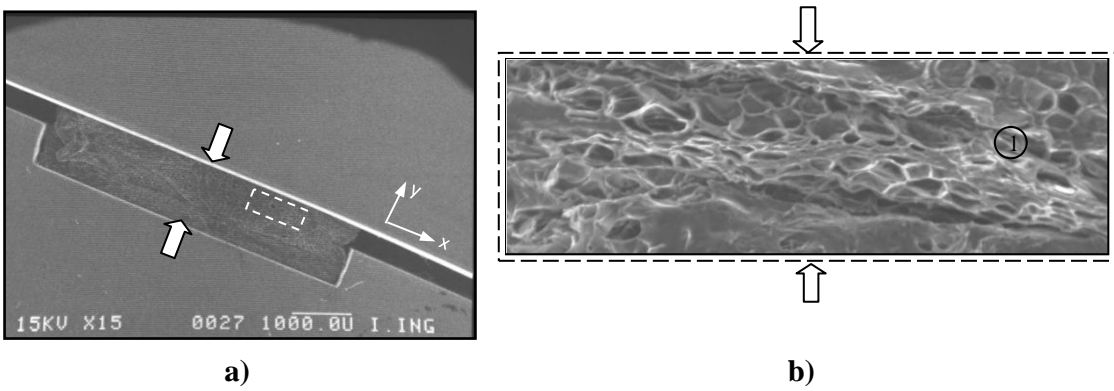


Figura 4.10 Estructura interna del EPS al 62% de deformación axial a) 15 ampliaciones, b) 100 ampliaciones.

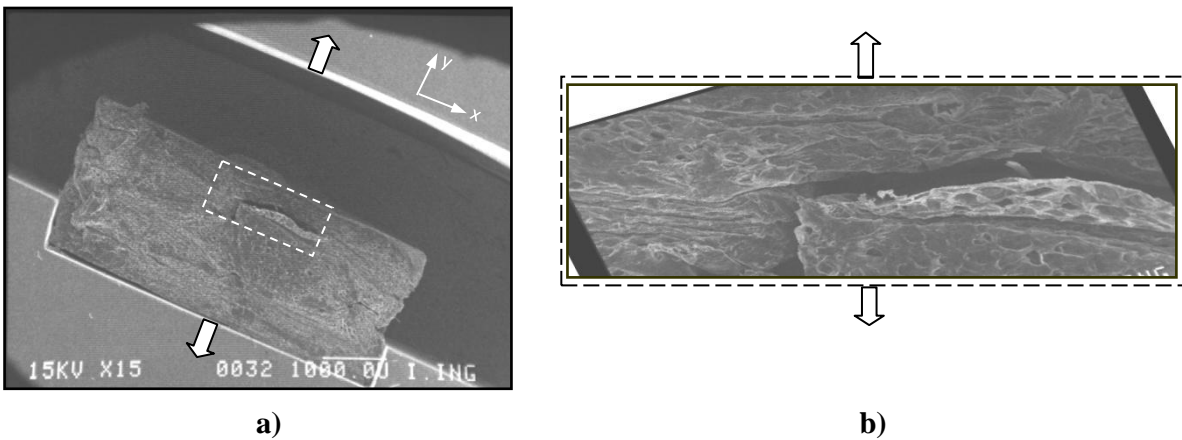


Figura 4.11 Descarga a) 15 ampliaciones, b) 80 ampliaciones

4.4 Evaluación del comportamiento esfuerzo-deformación del EPS a nivel macroscópico.

La resistencia mecánica por compresión del poliestireno expandido EPS depende de la densidad del material, la velocidad de desplazamiento, el esfuerzo de confinamiento, la temperatura, y la forma y tamaño de las muestras, así lo demuestran algunos trabajos entre los que se destacan los realizados por Preber et al. (1994), Elragi et al. (1995), Duškov (1997a), Zou y Leo (1998), Chun et al. (2004), Atmatzidis et al. (2005), Wong y Leo (2006).

Preber et al. (1995) desarrollaron pruebas de compresión triaxial no drenadas en muestras cilíndricas de EPS con densidades de 16, 20, 24 y 32 kg/m³ bajo esfuerzos de confinamiento de 0, 21, 41 y 62 kPa y a una velocidad de deformación de 0.5%. Basados en estos resultados propusieron un modelo bilineal para simular el comportamiento esfuerzo-deformación del EPS, cuyas ecuaciones están definidas como función de la densidad del material y del esfuerzo de confinamiento debido a que estos dos parámetros influyen en el comportamiento del material.

Duškov (1997a) evaluó la resistencia a compresión del EPS mediante pruebas de compresión no confinadas en muestras cilíndricas de EPS con densidades de 15 y 25 kg/m³ bajo condiciones de temperatura bajas y velocidades de desplazamiento entre 0.2 y 10 mm/min. Los resultados obtenidos muestran que la resistencia a la compresión del EPS aumenta en la medida que es mayor la velocidad de desplazamiento de la muestra y en la medida que disminuye la temperatura, lo cual refleja el comportamiento viscoso de este material.

Zou y Leo (1998) analizaron la dependencia de la resistencia a la compresión del EPS con la densidad del material y el esfuerzo de confinamiento mediante la realización de pruebas triaxiales no drenadas en muestras cilíndricas de densidades de 12, 21 y 27 kg/m³ las cuales se sometieron a esfuerzos de confinamiento de 10, 20, y 30 kPa. En este trabajo se estimaron valores de la relación de Poisson a través de lecturas de deformación volumétrica y deformación axial en la parte superior de la muestra, se proponen ecuaciones que relacionan la densidad del material y el esfuerzo de confinamiento del material con su resistencia a la compresión pero de forma independiente.

Chun et al. (2004) llevaron a cabo pruebas triaxiales no drenadas en muestras cilíndricas de densidades de 25 y 30 kg/m³ bajo esfuerzos de confinamiento de 0, 20 40 y 60 kPa y a una velocidad de deformación de 1 mm/min. En este trabajo se presentan valores de la relación de Poisson estimados a partir de lecturas de deformación volumétrica y deformación axial en la

parte superior de la muestra. Con base en los resultados obtenidos se propuso un modelo de comportamiento de tipo hiperbólico para predecir el comportamiento esfuerzo- deformación del EPS y una expresión para predecir la relación de Poisson del EPS. Las ecuaciones propuestas en este trabajo están definidas en función de la densidad del EPS y del esfuerzo de confinamiento.

Atmatzidis et al (2005) realizaron pruebas triaxiales no drenadas en muestras cúbicas y cilíndricas de EPS con densidades de 10 a 35 kg/m³ y bajo condiciones de confinamiento de 0, 15 y 25 kPa. Los resultados de estas pruebas de laboratorio evidenciaron que la resistencia a compresión del EPS no sólo es función de su densidad y del esfuerzo de confinamiento sino que también de la forma y tamaño de las muestras. Para una geometría dada, la resistencia tiende a aumentar en la medida que son mayores las dimensiones de la muestra.

Wong y Leo (2006) construyeron un modelo elastoplástico que describe el comportamiento compresivo del material en función de seis parámetros que deben obtenerse mediante pruebas triaxiales de laboratorio. Para la verificación de este modelo se llevaron a cabo pruebas triaxiales no drenadas en probetas cilíndricas de EPS con densidad de 20 kg/m³, a una velocidad de desplazamiento de 0.2 mm/min y bajo esfuerzos de confinamiento de 0, 20, 40 y 60 kPa.

Lo anterior permite ver que de las variables que influyen en el comportamiento compresivo del EPS, la densidad es la más estudiada, le siguen el esfuerzo de confinamiento, la velocidad de deformación, la temperatura y el tamaño y la forma de las muestras. Sin embargo, algunas de estas investigaciones son un poco limitadas debido a su número y a que algunas de ellas no abarcan rangos amplios de las variables estudiadas. Por otro lado, en ninguno de estos trabajos se realizaron mediciones directas de las deformaciones radiales, en todos los casos los valores de la relación de Poisson son estimados con base en mediciones de cambios volumétricos de la muestra de EPS. Todo esto sugiere que se deben de realizar investigaciones adicionales que coadyuven en el avance del conocimiento del comportamiento compresivo del EPS bajo carga estática un poco más a fondo. Debido a los alcances propuestos en esta investigación, tanto el efecto de la temperatura como el de la geometría de las muestras de EPS, en su resistencia a la compresión no se estudiaron.

Con el fin de determinar la influencia que ejercen la densidad ρ del EPS, el esfuerzo de confinamiento σ_3 , y la velocidad de desplazamiento $\dot{\delta}$ de la muestra en la relación esfuerzo-deformación y la relación de Poisson ν del material, se realizaron pruebas triaxiales en

muestras de poliestireno expandido EPS con densidades de 17 a 30 kg/m³, sometidas a esfuerzos de confinamiento de de 0 a 60 kPa, variando la velocidad de deformación de la probeta y bajo condiciones ambientales de 23°C grados de temperatura y una humedad promedio del 40%. Las dimensiones de las probetas fueron de 10 cm de diámetro y 17 cm de longitud, todas las probetas fueron labradas mediante el proceso de cortado con alambre caliente controlado por computadora con el fin de garantizar la uniformidad geométrica de las muestras. El esfuerzo de confinamiento se aplicó al interior de la cámara triaxial mediante aire a presión, no se utilizó membrana de recubrimiento para las probetas, debido a que una serie de pruebas preliminares indicó que la resistencia del material no variaba con el uso o no de membrana, así como con el uso de agua en la cámara triaxial. Esto último debido a que las pruebas realizadas son relativamente rápidas, y durante ellas, el porcentaje de agua absorbida por las muestras de EPS es mínimo.

Para la determinación de la relación de Poisson ν , se instalaron sensores de aproximación para medir la deformación radial y sensores de deformación axial tipo LVDT en los extremos superior (TMS) e inferior (TMI) del tercio medio de la probeta, además del sensor de deformación axial tipo LVDT ubicado en la parte superior de la cámara triaxial, tal como se ilustra en la Figura 4.12.

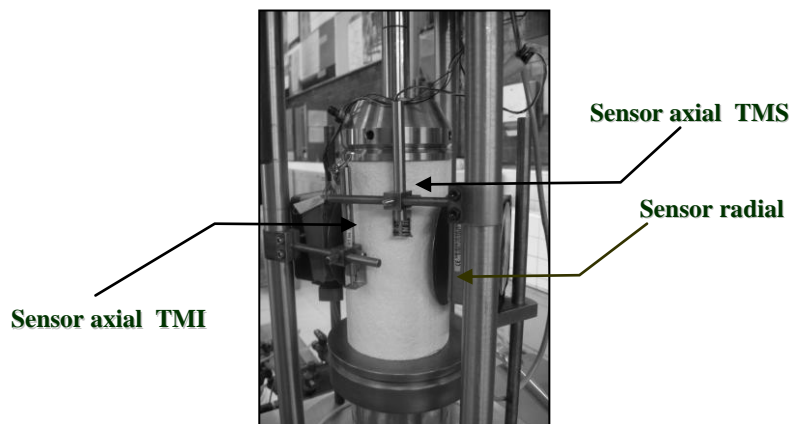


Figura 4.12 Esquema instrumentación

4.4.1 Presentación de resultados

En las Figuras 4.13 a 4.15, se presentan las relaciones esfuerzo-deformación de las muestras de EPS con densidades entre 17 y 30 kg/m³ bajo las condiciones mencionadas en el inciso 4.4. Las deformaciones axiales corresponden a las medidas en la parte superior de la probeta de EPS.

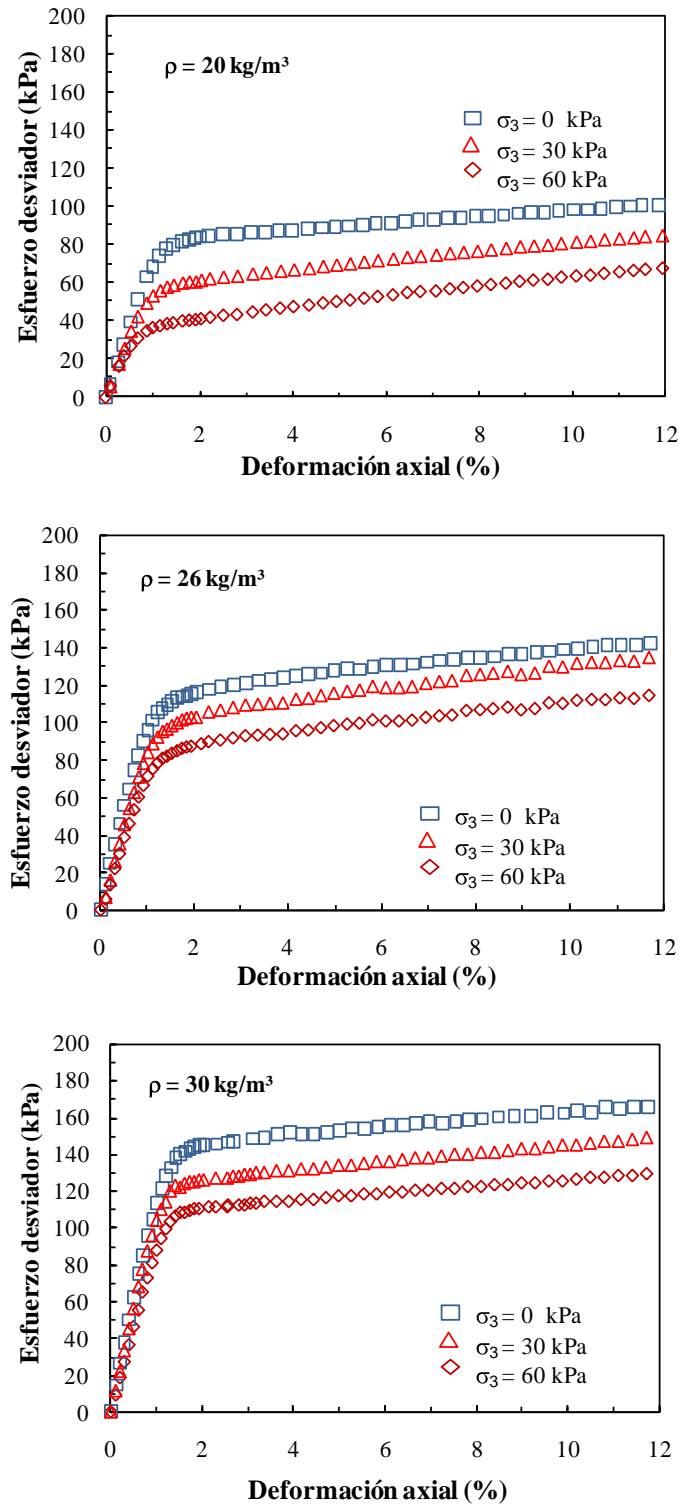


Figura 4.13 Resumen resultados, $\dot{\delta} = 0.5 \text{ mm/min}$

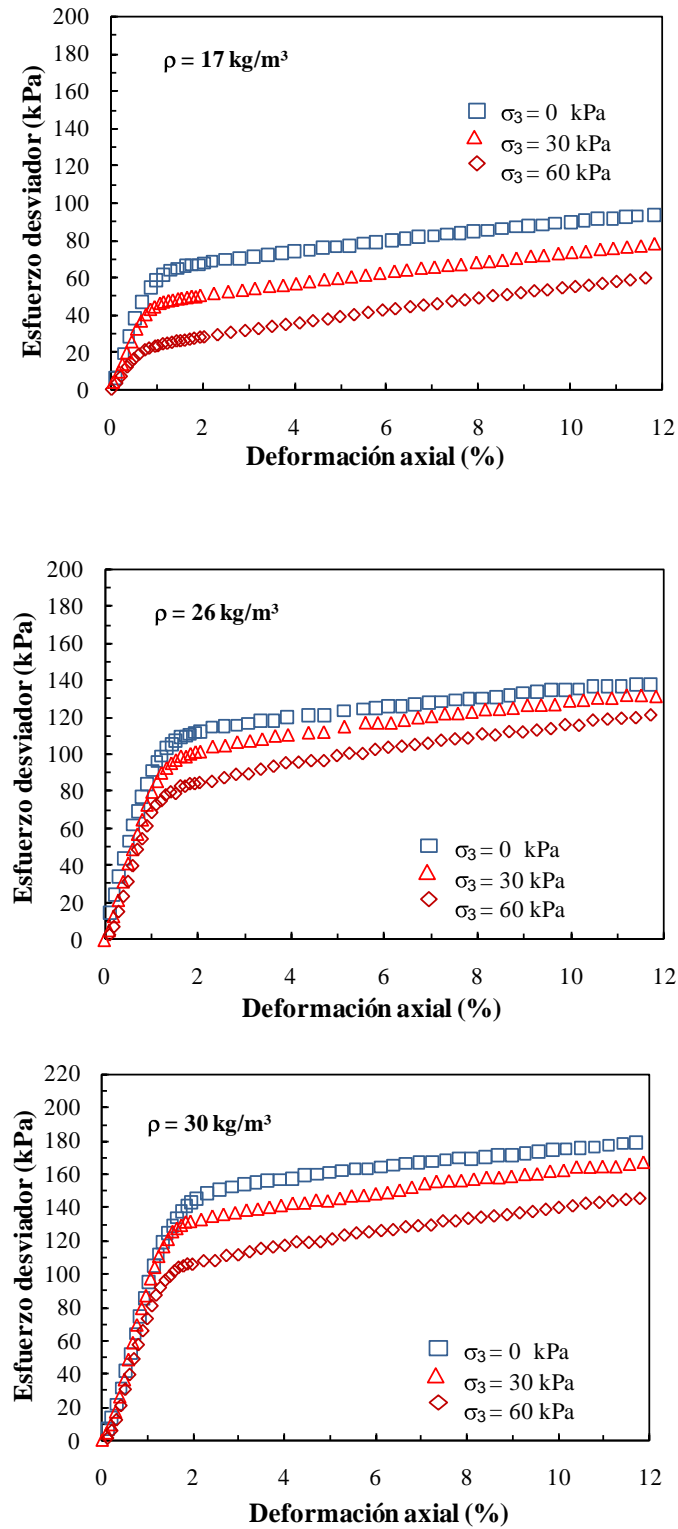


Figura 4.14 Resumen resultados, $\dot{\delta} = 1.0 \text{ mm/min}$

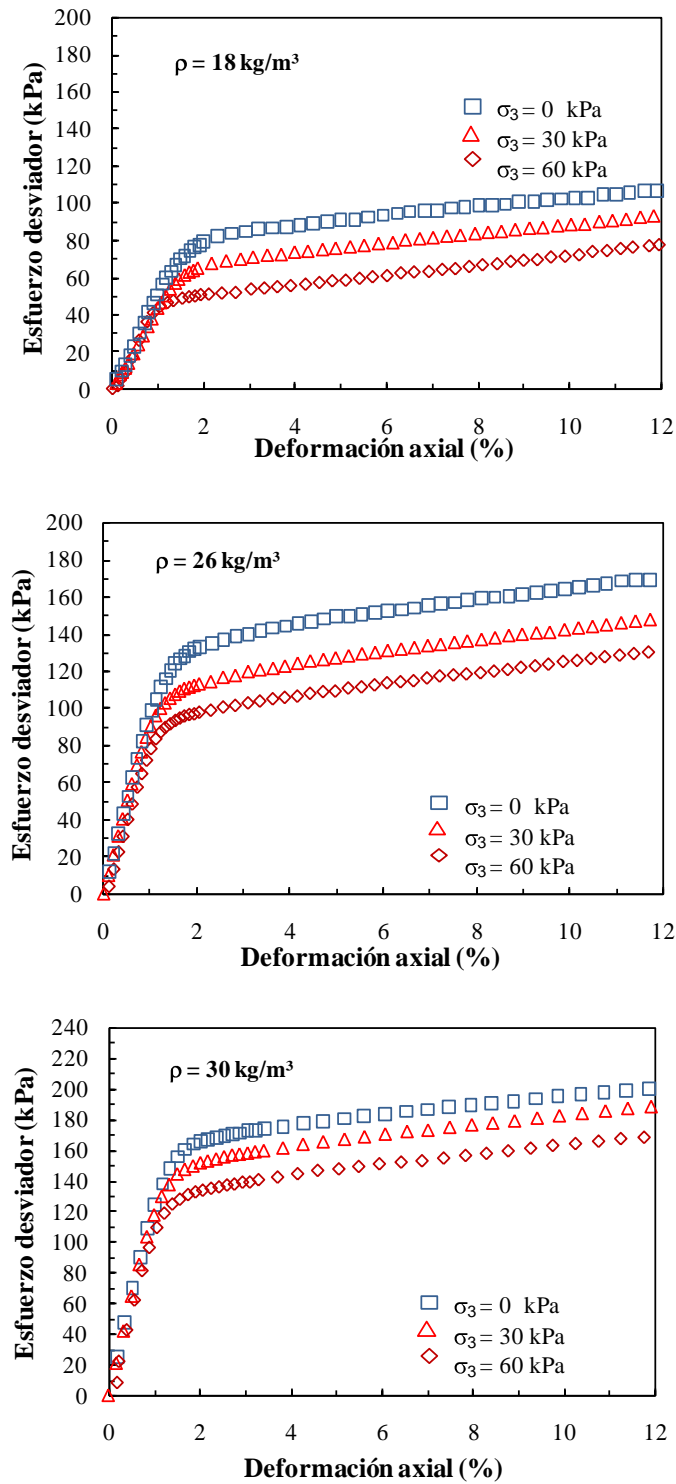


Figura 4.15 Resumen resultados, $\dot{\delta} = 10 \text{ mm/min}$

En la Tabla 4.1 se presenta un resumen de las pruebas realizadas y los valores del módulo tangente inicial E_i , esfuerzo de fluencia σ_y , módulo de plasticidad E_p y la relación de Poisson ν , obtenidos en cada una de ellas.

Tabla 4.1 Resumen de resultados

Prueba	ρ (kg/m ³)	σ_3 (kPa)	$\dot{\delta}$ (mm/min)	E_i (MPa)	E_p (kPa)	σ_y (kPa)	ν^*
P1	26	0	1.0	8.17	250.00	114.24	0.061
P2	26	30	1.0	7.72	290.07	103.51	0.072
P3	26	60	1.0	7.23	343.74	86.25	0.058
P4	26	0	10.0	9.80	319.59	137.45	0.072
P5	26	30	10.0	9.13	308.68	116.11	0.057
P6	26	60	10.0	8.16	309.26	97.90	0.072
P7	26	0	0.5	9.54	236.58	119.23	0.061
P8	26	30	0.5	8.72	303.05	104.14	0.053
P9	26	60	0.5	7.42	254.57	88.67	-
P10	30	0	0.5	10.66	207.67	145.09	0.068
P11	30	30	0.5	9.85	223.74	123.45	0.055
P12	30	60	0.5	8.65	183.97	110.00	-
P13	30	0	1.0	9.69	276.82	150.93	0.069
P14	30	30	1.0	9.68	352.17	132.57	0.064
P15	30	60	1.0	8.15	372.53	108.14	0.048
P16	30	0	10.0	12.50	311.99	169.25	0.066
P17	30	30	10.0	11.97	325.51	154.91	0.071
P18	30	60	10.0	11.12	318.31	136.02	0.064
P19	18	0	10.0	5.07	237.44	83.25	0.184
P20	18	30	10.0	4.37	246.22	67.71	0.183
P21	18	60	10.0	5.14	280.18	46.96	0.150
P22	17	0	1.0	6.50	203.89	71.26	0.126
P23	17	30	1.0	5.45	272.04	48.66	0.253
P24	17	60	1.0	3.54	318.62	25.60	0.003
P28	20	0	0.5	7.57	146.26	84.75	0.235
P29	20	30	0.5	6.28	182.35	63.92	0.211
P31	20	60	0.5	4.70	211.03	43.33	0.159

*valores calculados con base en las deformaciones axiales y radiales medidos en el tercio medio de la probeta y en el rango de deformaciones elásticas.

4.4.2 Análisis de resultados

Tal como se observa en las Figuras 4.13 a 4.15 para un rango de deformaciones menores al 12% y para densidades entre 17 kg/m³ y 30 kg/m³, el comportamiento esfuerzo-deformación del poliestireno expandido es elástico, plástico y viscoso.

4.4.2.1 Influencia de la densidad ρ

En las Figuras 4.13 a 4.15 se observa cómo el comportamiento esfuerzo-deformación del material varía de forma importante conforme lo hace la densidad ρ del EPS y esto se debe a que en la medida que la densidad aumenta, mayores son los espesores de las paredes de las celdas de poliestireno que conforman la estructura celular cerrada y por lo tanto, mayor su resistencia a la compresión.

En la Tabla 4.1 se puede apreciar cómo los valores del módulo tangente inicial E_i , el módulo de plasticidad E_p , y el esfuerzo de fluencia σ_y , presentan una clara dependencia de los valores de la densidad del material, todos ellos tienden a aumentar en la medida que la densidad del EPS crece. En esta misma tabla se observa que la relación de Poisson ν disminuye en la medida que la densidad aumenta. Sin embargo, es importante mencionar que debido a que en el rango elástico de deformaciones algunas muestras de EPS presentan pandeo, incluso aquellas que tienen relaciones de esbeltez de 1:1, la determinación de la relación de Poisson de este material es algo complejo, ya que la precisión en las mediciones de las deformaciones laterales, dependen de la relación de esbeltez de la muestra y del número y ubicación de los sensores.

4.4.2.2 Influencia de la velocidad de desplazamiento $\dot{\delta}$

La resistencia a la compresión del poliestireno expandido al igual que la de otros materiales celulares posee una alta relación con la velocidad de desplazamiento, y esto se debe a las características viscosas de las paredes de la estructura celular en este caso de poliestireno y a las fuerzas viscosas generadas cuando el aire encapsulado al interior de las celdas es comprimido (Ouellet et al, 2006). Todo esto hace que el material fluya lentamente y por lo tanto se generen deformaciones adicionales a las instantáneas. El fenómeno de fluencia lenta o creep está directamente relacionado con el tiempo y se manifiesta en los materiales de dos formas: cuando se aplica una carga de forma sostenida por un periodo de tiempo dado y cuando un proceso de carga se lleva a cabo ya sea controlando la velocidad de aplicación de la carga o la velocidad de deformación del material. La fluencia lenta del material hace que las deformaciones de tipo

viscoplástico sean mayores en pruebas desarrolladas a velocidades de deformación lentas ya que la duración de dichas pruebas es mayor.

De acuerdo a las Figuras 4.13 a 4.15 y a la Tabla 4.1 un incremento en la velocidad de desplazamiento hace que la resistencia a la compresión crezca, esto se ve reflejado en un aumento del módulo tangente inicial E_i , el esfuerzo de fluencia σ_y y en la mayoría de los valores del módulo de plasticidad E_p . Así mismo, no se observa una relación clara entre la relación de Poisson ν del material y la velocidad de desplazamiento. Algunas investigaciones realizadas por Ouellet et al. (2006) muestran además, que la velocidad de desplazamiento influye en el inicio de la etapa de densificación del material, a mayores velocidades de deformación el inicio de la etapa de densificación del material ocurre a deformaciones menores.

4.4.2.3 Influencia del esfuerzo de confinamiento σ_3

La influencia del esfuerzo de confinamiento en la resistencia del poliestireno expandido es una variable poco estudiada y poco cuestionado ha sido su efecto hasta el momento. Preber et al. (1994), Duškov (1997), Zou y Leo (1998), Chun et al. (2004), Atmatzidis et al. (2005), y Wong y Leo (2006) realizaron pruebas de compresión simple y triaxiales en muestras de EPS bajo esfuerzos de confinamiento no mayores a los 65 kPa.

En las Figuras 4.13 a 4.15 y en la Tabla 4.1 se puede observar que existe una marcada influencia del esfuerzo de confinamiento en el comportamiento a compresión de la muestra. Cuando éste aumenta los valores del módulo tangente inicial E_i y el esfuerzo de fluencia σ_y disminuyen así como la abscisa de fluencia, mientras que el módulo de plasticidad E_p aumenta en la mayoría de los casos.

Con respecto a la relación de Poisson ν , los resultados obtenidos no permiten definir con claridad si el esfuerzo de confinamiento ejerce alguna influencia sobre este parámetro. Sin embargo, cabe anotar Chun et al. (2004), encontraron expresiones que permiten estimar la relación de Poisson con los valores de la densidad del EPS y del esfuerzo de confinamiento.

En las aplicaciones geotécnicas los bloques de poliestireno expandido están sometidos a diferentes niveles de esfuerzos laterales, en algunos casos estos esfuerzos pueden ser bajos y por lo tanto podrán desprejarse con el propósito de simplificar del problema. Sin embargo, esta práctica no debe generalizarse ya que existen otras situaciones en los que el material puede estar sometido a esfuerzos de confinamiento mayores, y al no tomar en cuenta sus efectos de disminución en la resistencia, los diseños resultantes podrían ser inseguros.

De toda la literatura revisada durante la ejecución de esta investigación no se pudo encontrar algún comentario que hiciera mención a las posibles causas que hacen que el esfuerzo de confinamiento ocasione una disminución en la resistencia a la compresión del EPS, situación contraria a la que se presenta en los suelos, en los cuales la resistencia a la compresión aumenta conforme lo hace el esfuerzo de confinamiento.

Durante la realización de todas las pruebas triaxiales se pudo observar que al aplicar el esfuerzo de confinamiento, el área seccional de la probeta disminuía cierta cantidad lo cual se hacía más evidente en la medida que dicho esfuerzo aumentaba, se pudo observar también cómo este comportamiento siempre ocurría en forma indistinta al uso o no de membrana y a la forma en que se aplicara el esfuerzo de confinamiento ya fuera mediante agua o aire. Por lo anterior, se decidió entonces plantear la hipótesis (hipótesis i) de que la disminución de la resistencia del material era aparente y podría ser corregida al tomarse en consideración la disminución del área de la probeta en el cálculo de dicha resistencia.

Posteriormente, al realizar mediciones de la variación del radio y la altura inicial de la probeta mediante la aplicación de esfuerzos de confinamiento de 30 kPa y 60 kPa a probetas con densidades de 20 a 30kg/m³, se pudo constatar que la disminución en la altura de la probeta era casi nula y la disminución en el área seccional en todos los casos fue del orden del 0.3%, un valor muy bajo que no representó un cambio apreciable en los resultados de las pruebas al ser nuevamente calculadas utilizando este concepto de área corregida.

Al descartar la esta hipótesis acerca de la disminución en la resistencia del EPS a causa del confinamiento, se planteó una nueva hipótesis (hipótesis ii), la cual aunque resulta más plausible debe ser verificada. Esta se expone a continuación:

Basados en las observaciones microscópicas en las cuales se pudo apreciar que al aplicar esfuerzos de compresión a una muestra de EPS, las esferas se deforman causando flexión e incluso pandeo de las paredes de las celdas. En este trabajo se plantea la hipótesis de que la disminución de la resistencia cuando se aplican esfuerzos de confinamiento se debe a que dicho esfuerzo modifica en forma parcial las estructura del EPS flexionando y/o pandeando algunos de sus elementos es decir, haciéndola más deformable sin que puedan apreciarse cambios volumétricos significativos, tal como se ilustra en la Figura 4.16. Esta hipótesis se apoya en el trabajo realizado por Lakes (1987) quien encontró que cuando un material celular se encuentra bajo compresión volumétrica, los elementos que conforman su estructura interna se deforman y exhiben pandeo. Por otra parte, las pruebas de absorción reportadas en el capítulo 3, indican

una posible ruptura de las ligas entre las esferas o perlas de EPS cuando se aplica un esfuerzo de confinamiento, lo cual podría explicarse al suponer que la modificación de la estructura celular debida al esfuerzo de confinamiento induce esfuerzos de cortante y/o tensión en los contactos de las esferas, debilitando estas uniones. El hecho que el esfuerzo de fluencia disminuya y ocurra a deformaciones menores al aumentar el esfuerzo de confinamiento, da soporte a la hipótesis ii.

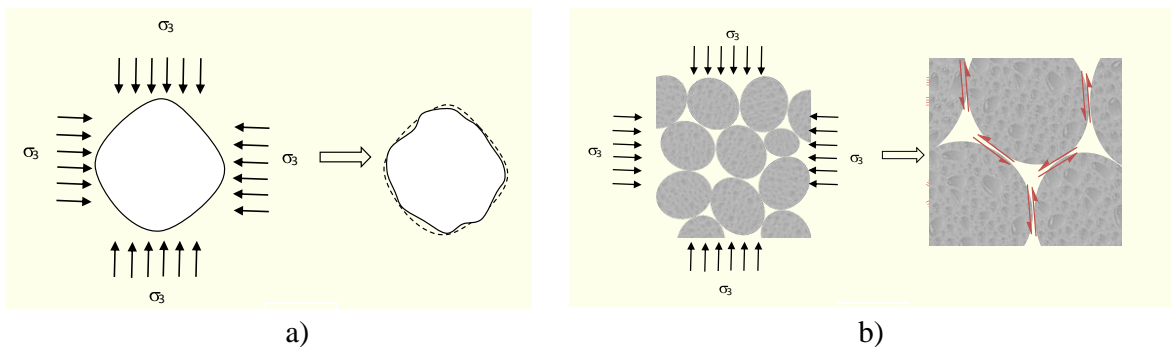


Figura 4.16 Estado previo de deformación (Hipótesis ii), a) Celdas, b) Esferas

Es importante mencionar que debido a la configuración de la estructura interna del EPS, cuando se aplican esfuerzos de confinamiento a una probeta de este material, la transmisión de esfuerzos al interior de la misma no es uniforme, lo cual da origen a un fenómeno complejo, cuyo entendimiento debe ser procurado mediante observaciones microscópicas o técnicas de escaneo computarizado a muestras confinadas.

4.4.2.4 Comportamiento de la estructura interna del EPS

Lakes (1987) observó que si un material celular que se encuentra bajo esfuerzos de compresión volumétrica se somete a un ciclo alternado de alta y baja temperatura, al final del proceso la estructura celular del material adoptará de forma permanente la configuración adquirida debido a la aplicación de los esfuerzos de compresión. El nuevo arreglo geométrico de la estructura interna hace que el material celular sufra cambios en su resistencia y se comporte como un material auxético¹. Los materiales auxéticos se caracterizan por expandirse lateralmente cuando se les aplica un esfuerzo de tensión axial y por contraerse lateralmente cuando se les aplica compresión axial, lo cual implica que las relaciones de Poisson de estos materiales sean negativas (ver Figura 4.17). Las características mecánicas de los materiales auxéticos son ampliamente usadas en aplicaciones biomédicas, automotrices y aeroespaciales.

¹ Del griego *auxetos* que significa “lo que puede ser incrementado”

Durante la compresión axial de una muestra de EPS, algunas celdas que conforman su estructura interna sufren estrechamiento lateral tal como sucede en los materiales celulares auxéticos, mientras que otras celdas se expanden lateralmente (ver Figuras 4.18 y 4.19). Lo anterior podría explicarse si se toma en cuenta que en la etapa de expansión y moldeo final de los bloques de EPS, las paredes de las bloqueras ejercen cierto confinamiento volumétrico bajo temperatura controlada lo cual podría generar en la estructura del material un cierto grado de auxeticidad localizada.

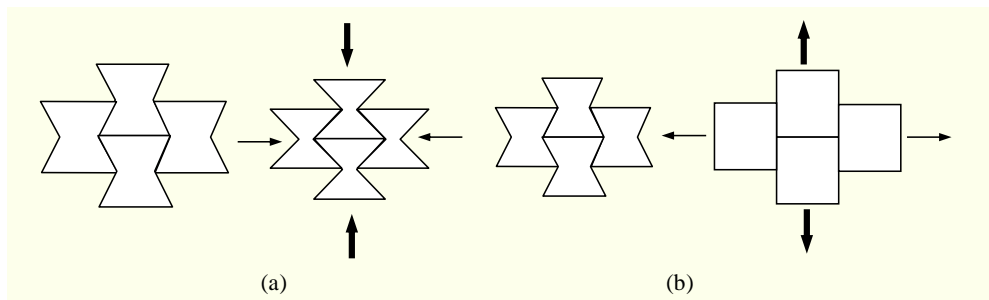


Figura 4.17 Mecanismos de deformación de un material auxético a) compresión, b) tensión.

Lo anterior nos hace pensar que la auxeticidad localizada de la estructura celular del EPS sumada al reacomodo de las esferas durante un proceso de compresión axial conlleva a que el poliestireno expandido EPS presente valores de la relación de Poisson bajos y cercanos a cero.

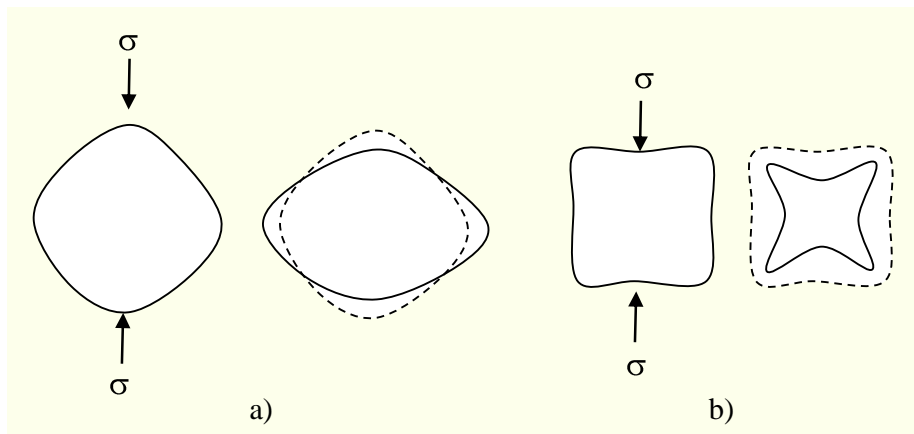


Figura 4.18 Comportamiento a compresión de materiales celulares a) no auxético b) auxético

En la Figura 4.19 se muestra parte de la estructura celular de una muestra de EPS antes y después de aplicarle un esfuerzo de compresión axial. Se observa que el ancho de las celdas marcadas con el número 1 y 2 tienden a ser constante al ser la muestra comprimida en sentido vertical hasta alcanzar un nivel de deformaciones del 20%, mientras que la celda marcada con el número 3 experimenta compresión lateral.

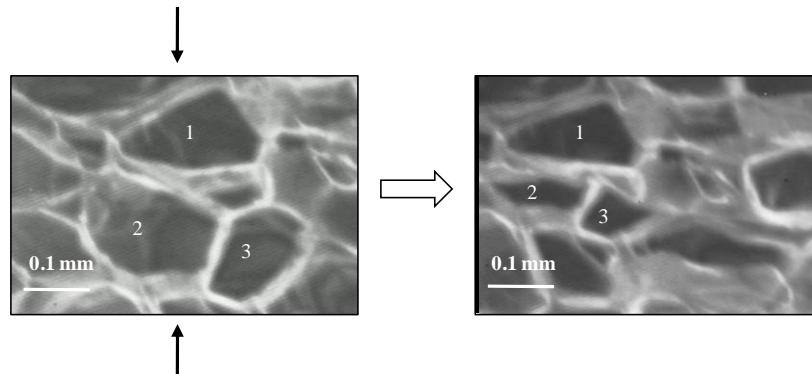


Figura 4.19 Compresión de la estructura celular del EPS

4.4.3 Círculos de Mohr

Los círculos de Mohr son una representación gráfica de los estados de esfuerzos de un material sometido a una prueba de compresión triaxial. Esta representación gráfica o diagrama de Mohr permite definir de manera gráfica la resistencia al esfuerzo cortante de un material y la determinación de una envolvente de falla.

En la Figura 4.20 se presentan los diagramas de Mohr del poliestireno expandido, construidos para un estado de esfuerzos correspondiente al 12% de la deformación axial del material. En esta figura se puede observar que la resistencia al esfuerzo cortante τ , aumenta conforme lo hacen la densidad y la velocidad de deformación. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre en los suelos, a medida que el esfuerzo confinante aumenta, el diámetro de los círculos disminuye. Lo anterior implica que la pendiente en cada uno de los puntos de la envolvente de resistencia para el estado de esfuerzos descrito, sea negativa. Esto significa que el “ángulo de fricción” es negativo, lo cual no tiene sentido físico e implica que las muestras de EPS no fallan por cortante. Además, tal y como se observa en la Figura 4.17 en algunos casos la envolvente de resistencia no es estrictamente lineal, va tornándose curva en el sentido en que aumentan los esfuerzos normales.

Debido a que durante el proceso de compresión axial el EPS no presenta un mecanismo de falla por cortante, el criterio de falla que debe adoptarse en este caso se debe definir con base a un estado de deformaciones que dependerá de los requerimientos de cada proyecto, y no basado en un estado de esfuerzos cortantes máximo como se hace en algunos casos en suelos.

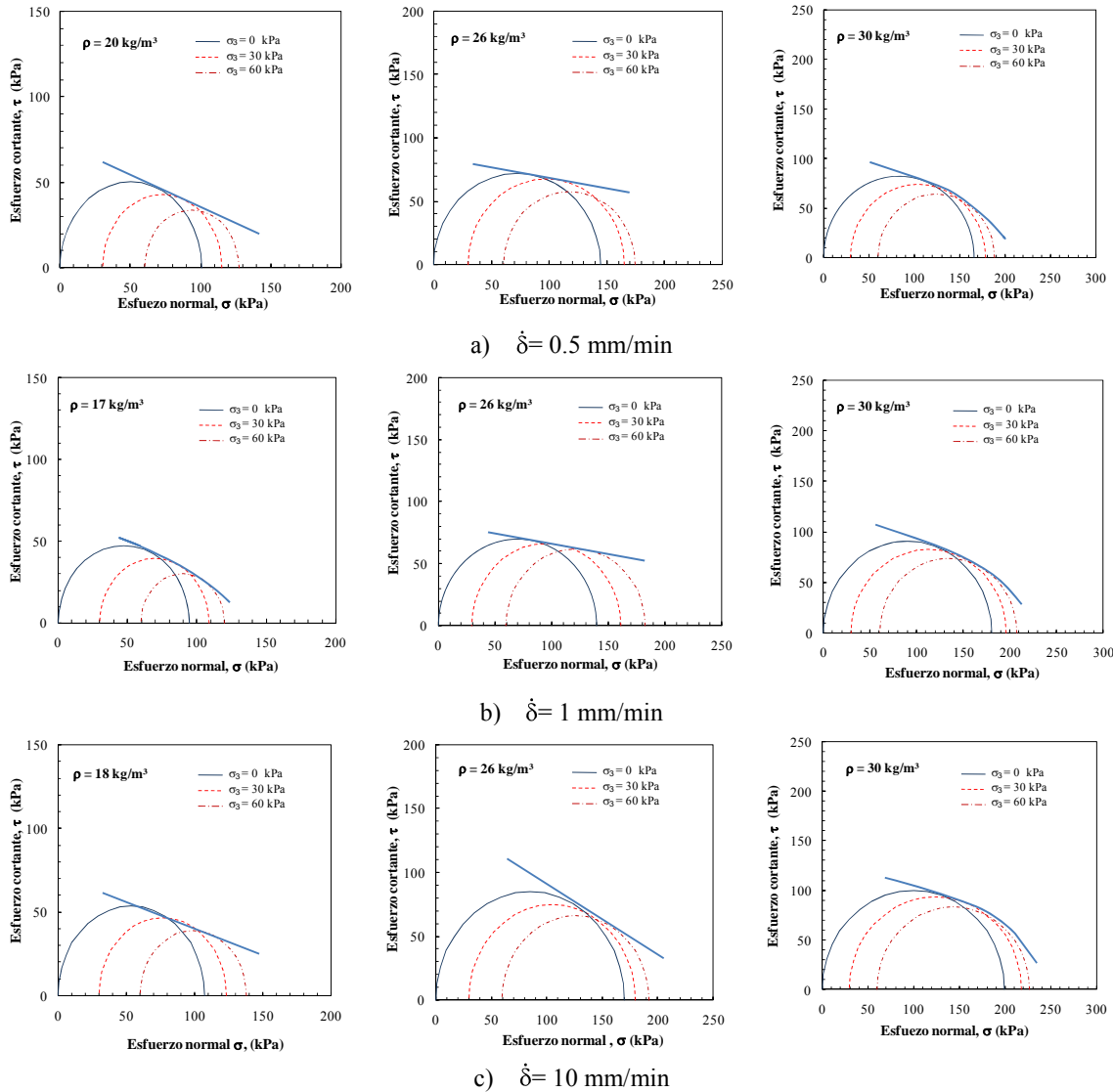


Figura 4.20 Círculos de Mohr

4.4.4 Trayectoria de esfuerzos

Las trayectorias de esfuerzos son diagramas usados en la teoría del estado crítico para la interpretación de resultados de pruebas de resistencia en suelos.

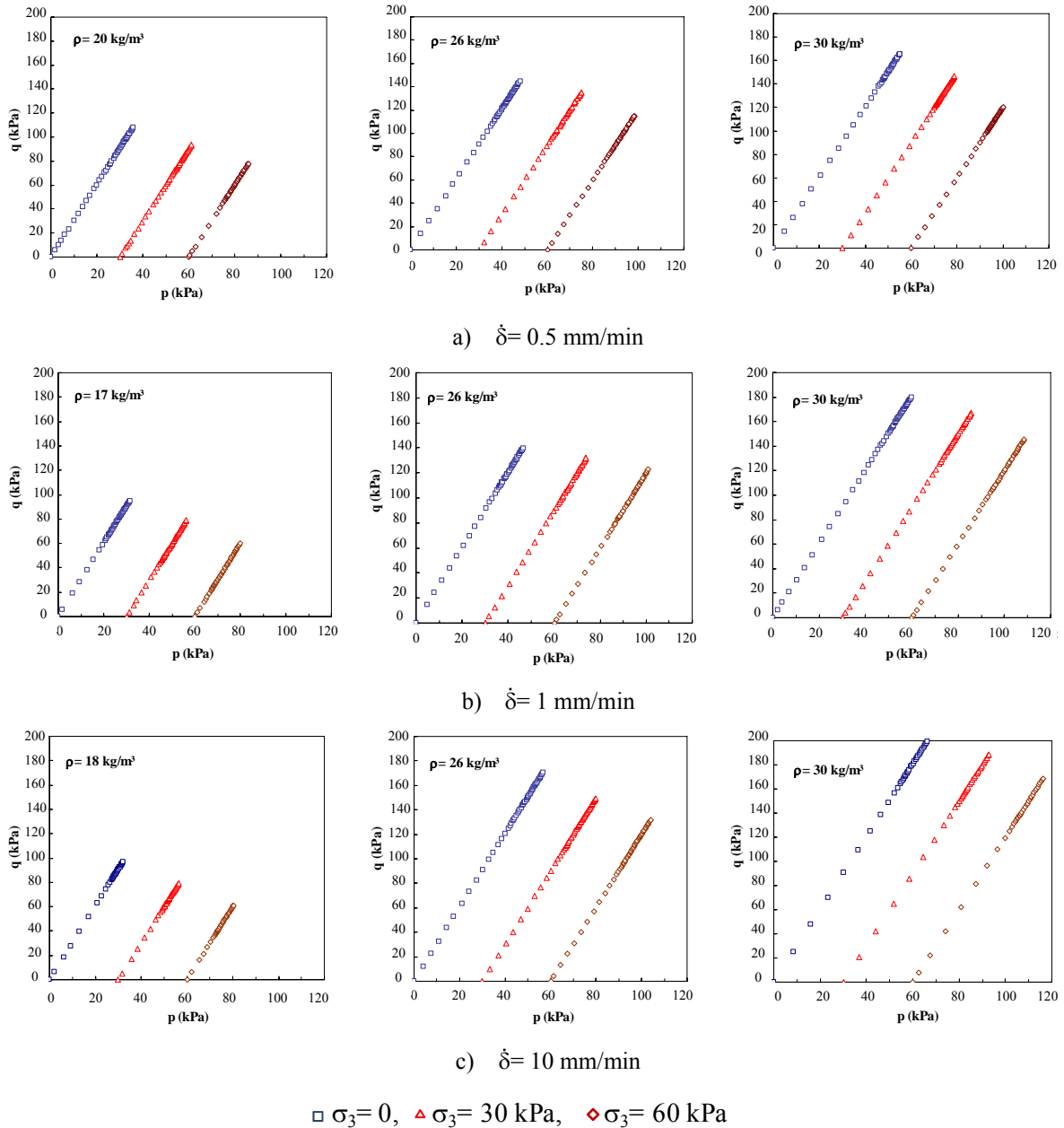


Figura 4.21 Trayectoria de esfuerzos, $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$

Los diagramas p-q permiten visualizar los diferentes estados de esfuerzos que presenta el suelo antes de alcanzar un estado límite para el cual el suelo sucumbe a la falla. Tal como se observa en la Figura 4.21, las trayectorias de esfuerzos del poliestireno expandido EPS son líneas paralelas con pendiente igual a 3, cuyo intercepto con el eje p corresponde al valor del esfuerzo de confinamiento aplicado en cada prueba. Estas trayectorias se asemejan a las obtenidas para muestras de suelos en pruebas de tipo (CD) construidas en términos de esfuerzos efectivos o

pruebas de tipo (CU) construidas en términos de esfuerzos totales. Si bien para el caso del EPS los diagramas p-q permiten visualizar el estado de esfuerzos que pueden ser llamados totales al representar la resistencia de todo el material en conjunto (aire y poliestireno), al no existir un mecanismo de falla por resistencia en este material, la teoría del estado crítico no es aplicable para la modelación de su comportamiento.

4.4.5 Superficie de fluencia

Se define como superficie de fluencia al espacio geométrico que representa las diferentes combinaciones de esfuerzos p-q para los cuales un material en este caso el poliestireno expandido EPS, experimenta deformaciones plásticas. De acuerdo a Gibson y Ashby (1999), la superficie de fluencia de los materiales celulares presenta una forma de elipsoide que depende de la densidad del material. Sin embargo, de acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 4.22 es claro que la ubicación geométrica de la superficie de fluencia del EPS, no sólo depende de la densidad del material sino que además varía con la velocidad de desplazamiento con la que se realizó la prueba triaxial, esto último debido a las características viscosas del material.

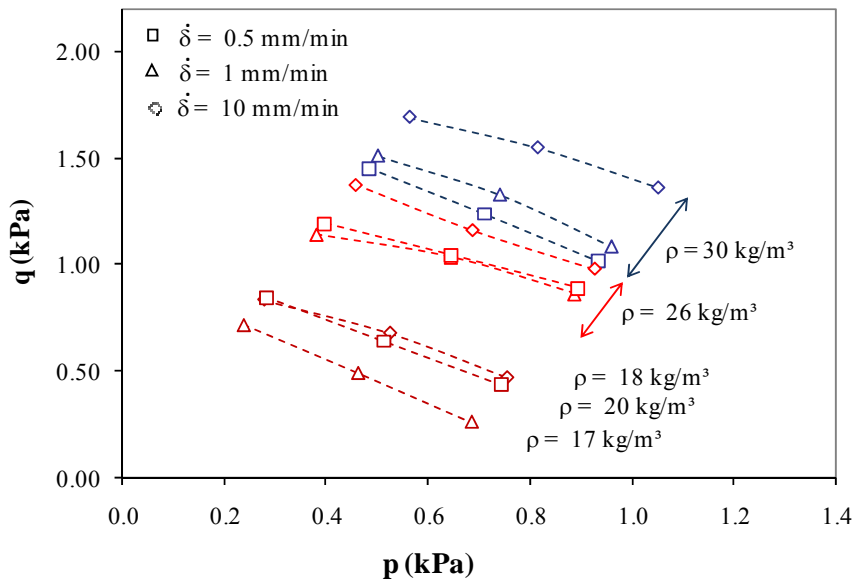


Figura 4.22 Superficies de fluencia

Pese al limitado número de puntos con los que fueron construidas las superficies de fluencia, en la Figura 4.22 se puede observar la forma de cada una de estas superficies se asemeja a una figura cónica. Sin embargo, queda pendiente para futuros trabajos, realizar pruebas triaxiales adicionales que permitan precisar la forma de cada una de las superficies de fluencia del EPS y por lo tanto formular ecuaciones para la estimación de esta frontera de plasticidad.

4.5 Modelo de comportamiento

A la fecha han sido desarrollados varios modelos para describir el comportamiento esfuerzo-deformación del poliestireno expandido EPS, los cuales pueden clasificarse en dos categorías. La mayoría de los modelos documentados hasta el momento pertenecen a la primera categoría y describen el comportamiento esfuerzo-deformación del EPS sin tomar en cuenta el fenómeno de fluencia lenta o creep debido a las características viscosas del EPS, Preber et al. (1995) y Chun et al. (2004) presentan ecuaciones que permiten predecir dicho comportamiento, mediante expresiones que relacionan la densidad y esfuerzo de confinamiento del material. Por otra parte Hazarika (2006) y Wong y Leo (2006) presentan modelos constitutivos basados en la teoría de la plasticidad, el primero de estos dos autores incluye en la formulación de su modelo la influencia del tamaño y la forma de las muestras de EPS en su comportamiento mecánico.

La segunda categoría agrupa a aquellos modelos que describen el comportamiento esfuerzo-deformación del material tomando en cuenta las deformaciones a largo plazo que sufrirá el EPS ante la aplicación de un esfuerzo por un periodo de tiempo determinado. A este grupo pertenecen los modelos basados en la ecuación de Findley (Findley y Khosla, 1956).

Basados en los resultados obtenidos de las pruebas triaxiales mostradas en las Figuras 4.13 a 4.15 y la Tabla 4.1, y considerando que el material presenta un comportamiento elástico, plástico y viscoso, se propuso un modelo bilineal capaz de simular la relación esfuerzo-deformación del EPS para diferentes densidades y valores de esfuerzos de confinamiento y velocidades de desplazamiento. Al aplicar el método de ajuste de regresión multilínea a los resultados de laboratorio, se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$E_i = -1.111 + 0.397\rho - 0.029\sigma_3 + 0.054\dot{\delta} \quad (R^2=0.90) \quad (4.1)$$

$$E_p = -23.326 + 4.9406\rho + 0.50\sigma_3 + 208.369\dot{\delta} - 19.044\dot{\delta}^2 \quad (R^2=0.70) \quad (4.2)$$

$$\sigma_y = 31.358 + 0.133\rho^2 - 0.620\sigma_3 + 1.137\dot{\delta} \quad (R^2=0.99) \quad (4.3)$$

$$\nu = 0.475 - 0.0144\rho \quad (R^2=0.45) \quad (4.4)$$

donde, E_i es el módulo tangente inicial, E_p es el módulo de plasticidad, σ_y es el esfuerzo de fluencia, ν la relación de Poisson, ρ es la densidad del EPS ($17 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 30 \text{ kg/m}^3$), σ_3 es el esfuerzo de confinamiento ($0 \text{ kPa} \leq \sigma_3 \leq 60 \text{ kPa}$), $\dot{\delta}$ la velocidad de desplazamiento aplicada

($0.5 \text{ mm/min} \leq \dot{\delta} \leq 10 \text{ mm/min}$) y R es el coeficiente de correlación, valor obtenido del análisis multineal.

Las ecuaciones 4.1 a 4.3 expresan la relación que existe entre los parámetros E_i , E_p y σ_y , y los valores de la densidad del material, el esfuerzo de confinamiento y la velocidad de desplazamiento. Sin embargo, tal como se mencionó anteriormente, los valores de la relación de Poisson calculados con base en las mediciones de deformaciones verticales y radiales en el rango elástico de cada una de las pruebas, muestra una clara dependencia con los valores de la densidad del material y una ligera tendencia a disminuir con la aplicación del esfuerzo de confinamiento. Por lo anterior, se decidió proponer una expresión (Ec. 4.4) para la relación de Poisson sólo en función de la densidad y no de las demás variables analizadas por no ser clara la influencia de ellas sobre dicho parámetro. Los efectos de la aplicación de un esfuerzo en forma sostenida en el EPS, no son incluidos en el presente modelo y serán analizados de forma independiente posteriormente.

4.5.1 Verificación del modelo

La verificación del modelo de comportamiento se realizó mediante la comparación de los resultados de las pruebas triaxiales y los obtenidos a partir de las ecuaciones 4.1 a 4.3. Esta comparación se ilustra en las Figuras 4.23 a 4.25. En estas Figuras se puede observar que el modelo bilineal propuesto en este trabajo de investigación predice de forma satisfactoria el comportamiento esfuerzo-deformación del EPS. Adicionalmente, tal como lo indica la Figura 4.26, con el propósito de evaluar la confiabilidad de este modelo en la predicción de las relaciones esfuerzo-deformación de muestras con densidades diferentes a las utilizadas en esta investigación para la determinación de sus ecuaciones, se compararon los resultados de las ecuaciones 4.1 a 4.3 con los resultados de las pruebas triaxiales realizadas por Zou y Leo (1998) en muestras de EPS de 5 cm de radio y 5 cm de altura. La predicción es buena en términos generales.

Las Figuras 4.27 a 4.30 muestran los valores del módulo tangente inicial, el módulo de plasticidad, el esfuerzo de fluencia, y la relación de Poisson obtenidos a partir de los resultados de las pruebas triaxiales para densidades de 26 y 30 kg/m^3 , de las ecuaciones 4.1 a 4.4 y de las ecuaciones propuestas por otros investigadores (e.g. Preber et al., 1994; Chun et al., 2004; Horvath, 1995) con base en resultados experimentales.

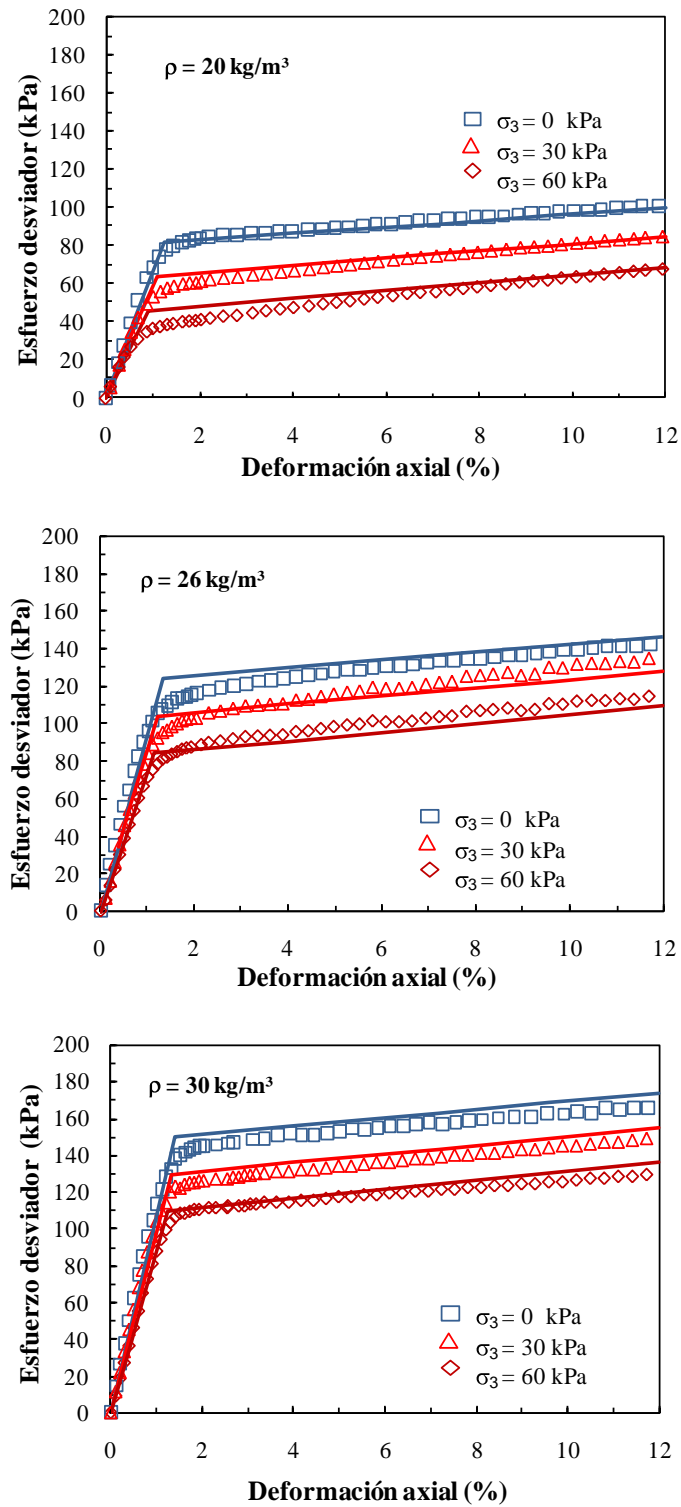


Figura 4.23 Predicción modelo, $\dot{\delta} = 0.5 \text{ mm/min}$

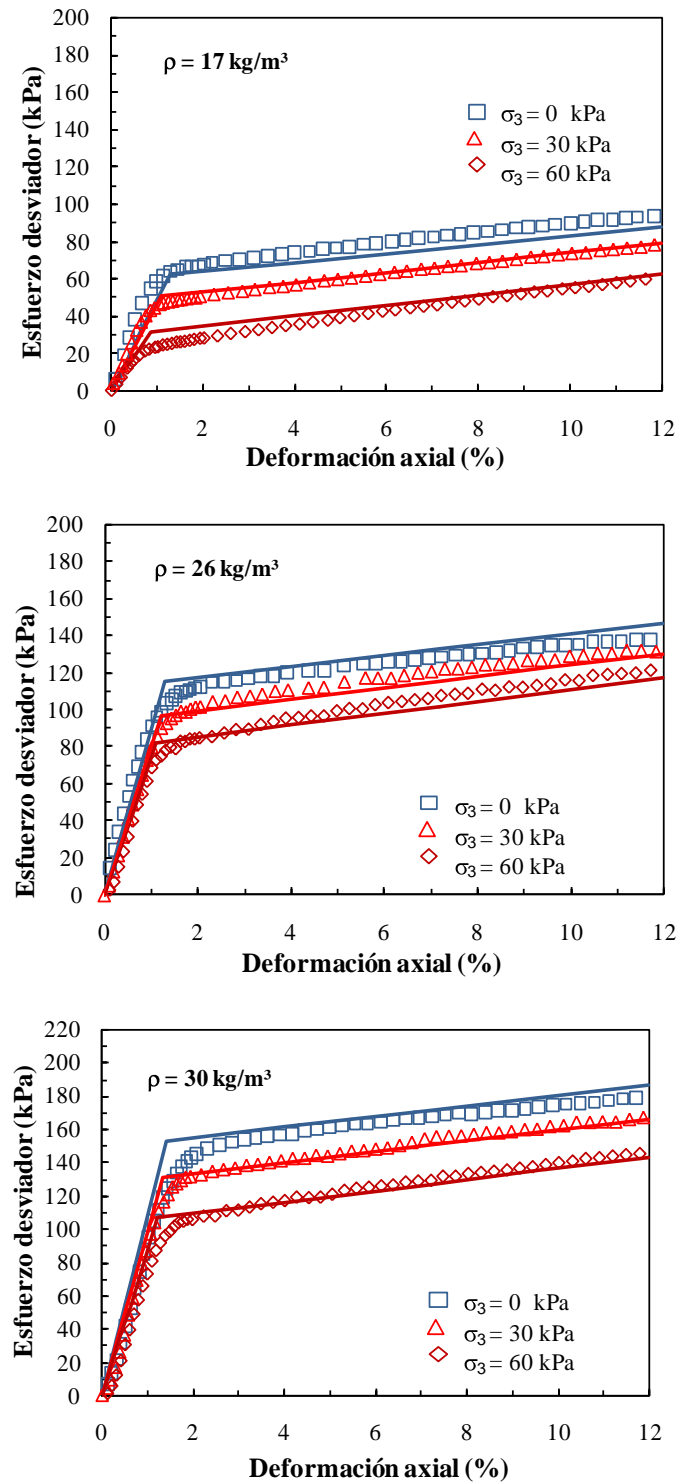


Figura 4.24 Predicción modelo, $\dot{\delta} = 1.0 \text{ mm/min}$

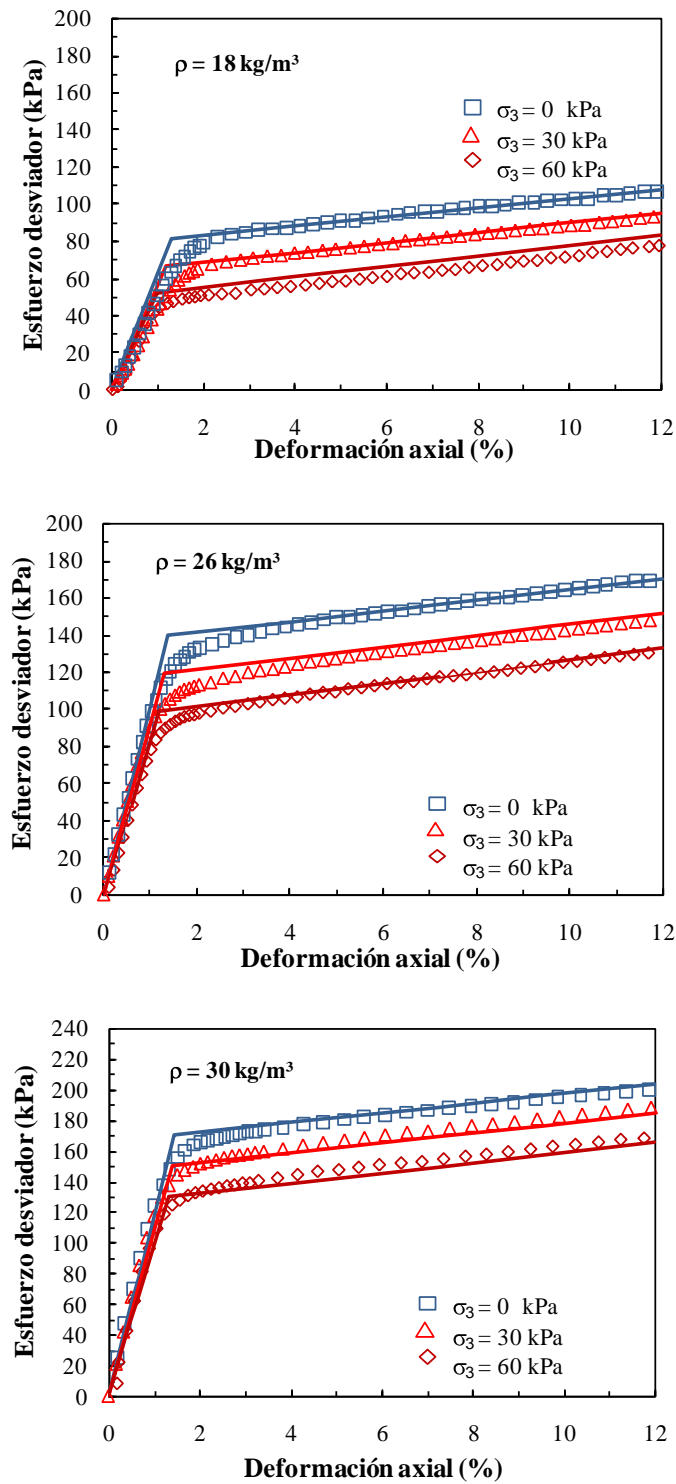


Figura 4.25 Predicción modelo, $\dot{\delta} = 10$ mm/min

En las Figuras 4.27 a 4.30 se puede observar que si bien la densidad es un parámetro que ejerce una notable influencia en el comportamiento compresivo del EPS; el esfuerzo de confinamiento así como la velocidad de desplazamiento son variables que también influyen en la relación.

Al comparar los resultados de las estimaciones obtenidas a partir de las ecuaciones propuestas por Preber et al. (1994), Chun et al. (2004), Horvath (1995) y presentadas en este trabajo de investigación, se notan diferencias significativas entre estos. La discrepancia se debe principalmente a que no existe un procedimiento estandarizado para la realización de pruebas triaxiales en muestras de EPS que especifique entre otros aspectos la velocidad de deformación o desplazamiento y las dimensiones de la muestra que deben utilizarse en cada prueba. Por lo tanto, al ser la resistencia a la compresión del EPS susceptible a cambios en la forma de la probeta (Hazarika, 2006) y a la velocidad de deformación o desplazamiento, los resultados experimentales en los que se basan los diferentes autores para proponer sus modelos, difieren entre sí en algunas ocasiones de forma considerable.

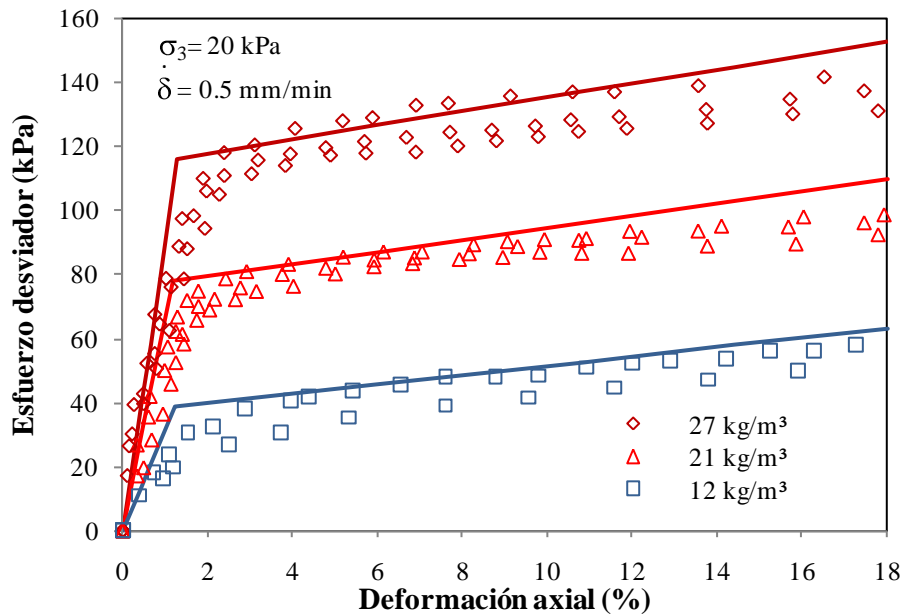


Figura 4.26 Predicción modelo, pruebas realizadas por Zou y Leo (1998)

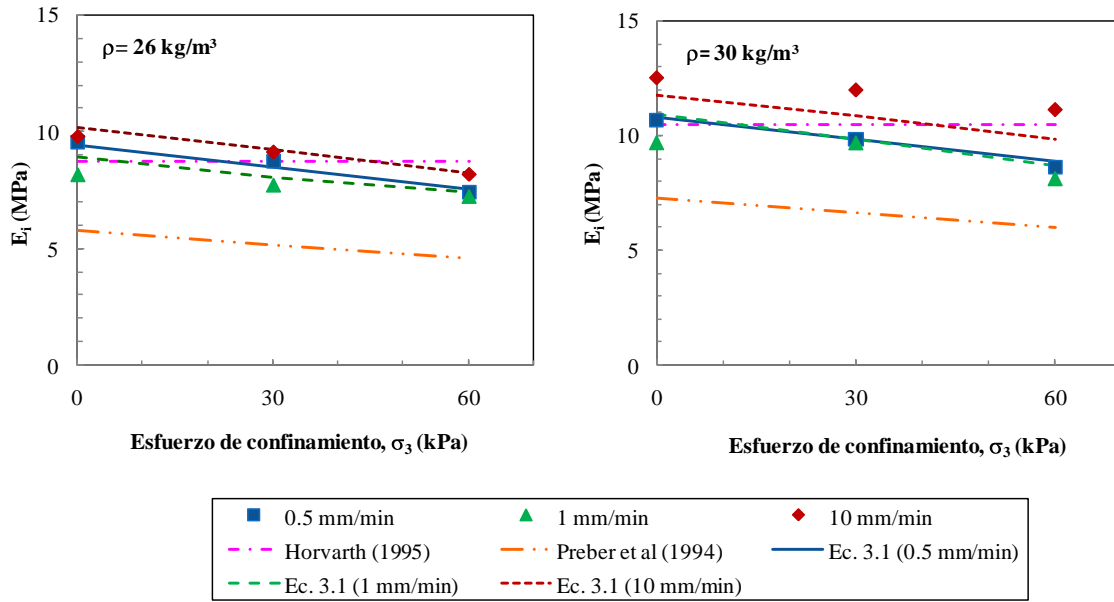


Figura 4.27 Comparación resultados módulo tangente inicial E_i

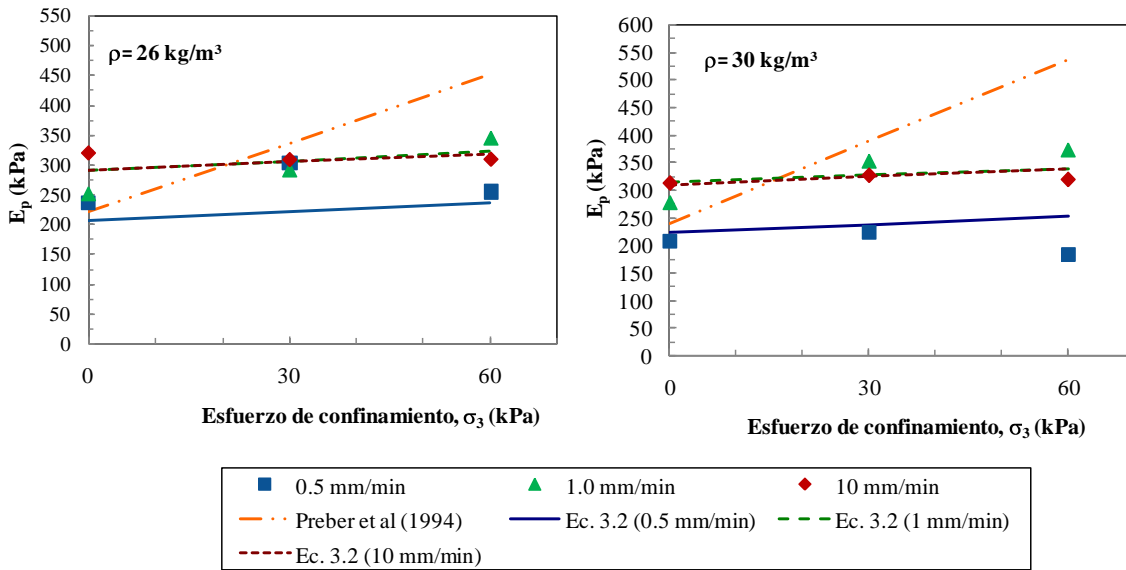


Figura 4.28 Comparación resultados módulo de plasticidad E_p

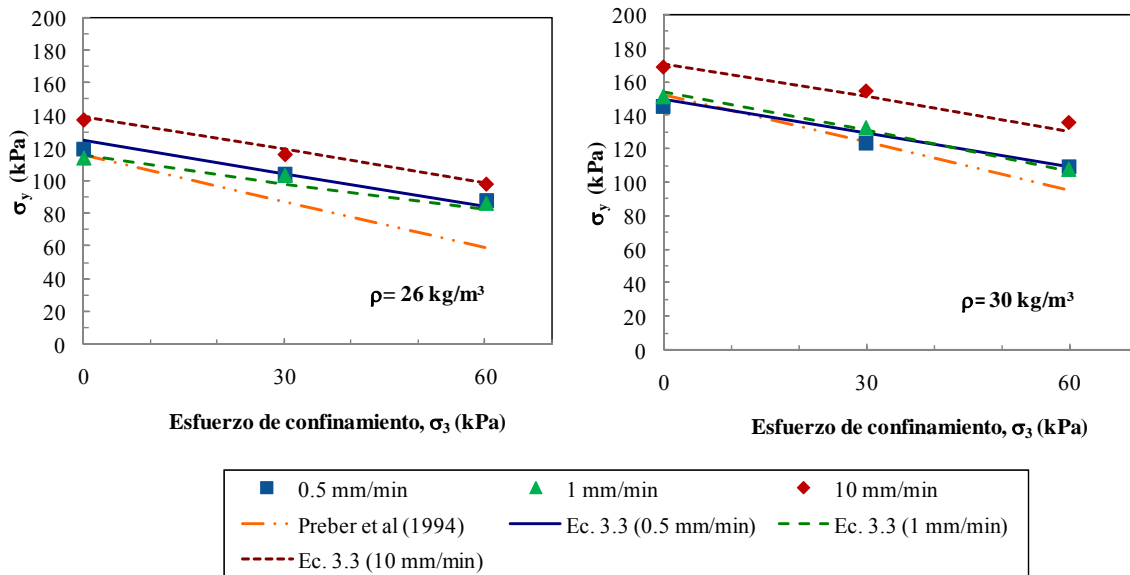


Figura 4.29 Comparación resultados esfuerzo de fluencia σ_y

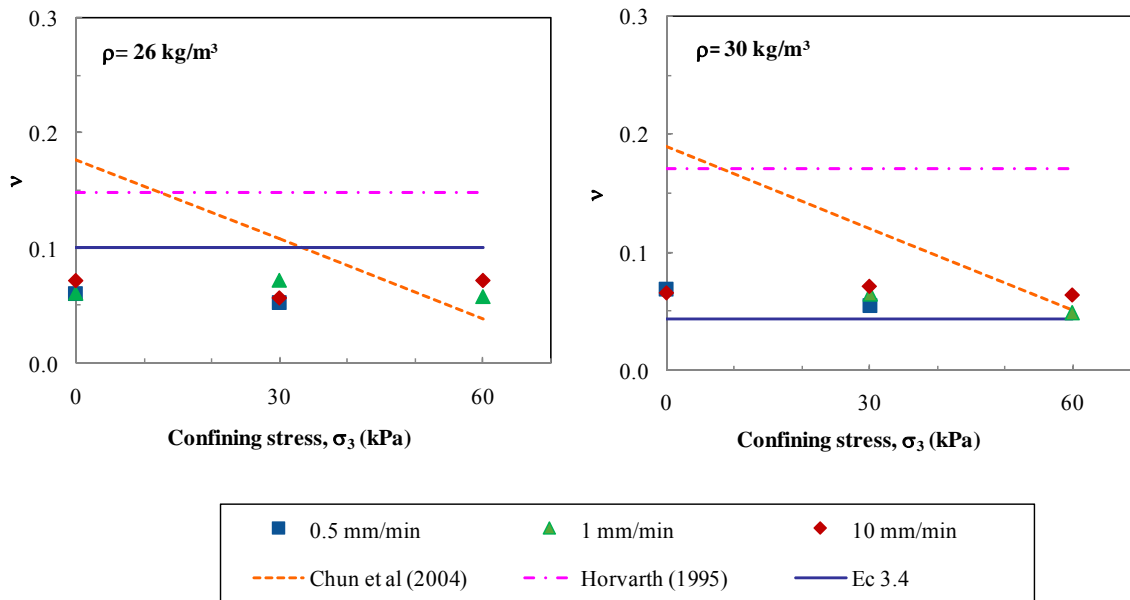


Figura 4.30 Comparación resultados relación de Poisson ν

4.6 Efectos de esfuerzo sostenido (Creep)

Todas las espumas poliméricas incluyendo el poliestireno expandido EPS presentan una respuesta bajo carga sostenida conocida como fluencia lenta o “creep”, la cual ocurre como consecuencia de las características viscosas de estos materiales.

Pese a que las deformaciones admisibles de los bloques de EPS utilizados en aplicaciones geotécnicas en la mayoría de los casos están limitadas al rango elástico del comportamiento esfuerzo-deformación del material, se espera que ocurran deformaciones adicionales no recuperables debido a la fluencia lenta del material. Cuando los bloques de EPS son utilizados en aplicaciones que involucren esfuerzos bajos o esfuerzos significativos sostenidos por periodos cortos las deformaciones por creep pueden obviarse con el propósito de simplificar los análisis del comportamiento compresivo del material. Sin embargo, para aplicaciones que involucren cargas de larga duración como ocurre en la mayoría de los casos, se deben realizar análisis adicionales para determinar las deformaciones debidas la fluencia lenta del material. Todo esto, con el propósito de obtener estimaciones razonables del comportamiento compresivo del EPS.

Las deformaciones por creep del EPS son principalmente función de la magnitud del esfuerzo aplicado, de la densidad del material, del tiempo, de la temperatura y de la geometría del material, así lo demuestran los trabajos realizados por Duškov (1997a), Horvarth (1998), Srirajan et al (2001) y Leo (2001).

Duškov (1997a), realizó pruebas de creep en muestras cilíndricas de EPS con densidades de 15 y 20 kg/m³ a las cuales sometió a esfuerzos sostenidos de 10 y 20 kPa por un periodo cercano a los 400 días, encontrando que las deformaciones por creep eran mayores en la medida que la carga sostenida aumentaba no importando la densidad del material; sin embargo, este criterio no puede generalizarse tal y como lo sugieren las pruebas de creep citadas por Horvath (1995), en las cuales se aprecia que el comportamiento de fluencia lenta está influenciado por la magnitud del esfuerzo aplicado y por la densidad. En este trabajo se observa que el efecto de la densidad comienza a ser notorio cuando la relación entre el valor mayor y el menor de las densidades analizadas es mayor a dos.

Horvarth (1998) evaluó el comportamiento de fluencia lenta en muestras cúbicas de EPS de densidad 20 kg/m³ a las cuales sometió a esfuerzos sostenidos de 30, 40 y 50 kPa, los resultados muestran que si la magnitud del esfuerzo aplicado aumenta, las deformaciones por creep del material son mayores.

Srirajan et al (2001), realizaron pruebas de creep en muestras cúbicas de EPS de diferentes tamaños y con densidades entre 12 y 30 kg/m³ las cuales fueron sometidas a diferentes niveles de esfuerzo por un periodo de tiempo que varió entre 2000 y 4000 horas. Los resultados de esta investigación mostraron que el fenómeno de fluencia lenta en el EPS depende del tamaño de las muestras. Se observó que para una densidad dada, las deformaciones por creep tienden a disminuir en la medida que aumenta el tamaño de la muestra.

Leo (2001) realizó pruebas de creep en muestras de EPS de 20 kg/m³ a las cuales aplicó esfuerzos sostenidos de 20 a 90 kPa bajo temperaturas de 23 y 40°C. Los resultados mostraron que las deformaciones por creep son mayores en la medida que el valor de la temperatura aumenta, y que además, estas deformaciones tienden a incrementarse de forma apreciable cuando se sobrepasan ciertos niveles de esfuerzo que dependen de la densidad del material.

Con el fin de analizar el comportamiento de fluencia lenta o creep en el largo plazo en el poliestireno expandido, en este trabajo se realizaron dos pruebas de compresión de larga duración en muestras de EPS con densidades de 24 y 30 kg/m³ con dimensiones $\phi = 6.5$ cm y $h = 6.3$ cm. Las características de cada una de las pruebas son mostradas en la Tabla 4.2 Esta serie de pruebas fue llevada a cabo bajo condiciones ambientales de 21°C \pm 2 grados de temperatura aproximadamente y una humedad promedio del 40%. El esfuerzo de compresión σ_e aplicado a cada muestra de EPS correspondió al 30% aproximadamente del esfuerzo de fluencia σ_y , este último estimado a partir de la ecuación 4.3 tomando en cuenta un esfuerzo de confinamiento igual a cero y una velocidad de deformación de 10 mm/min. El proceso de labrado de las muestras de EPS se hizo utilizando un alambre caliente con el fin de garantizar la uniformidad geométrica de las muestras.

Tal como se indica en la Figura 4.31, para la ejecución de las pruebas de creep se utilizaron dos consolidómetros convencionales, a los cuales se les retiró el porta-muestras de la base. Las mediciones de las deformaciones en las probetas de EPS se realizaron mediante un micrómetro manual.

Tabla 4.2 Características de las pruebas

Prueba	ρ (kg/m³)	σ_e * (kPa)	Duración (días)
CR-1	24	42	800
CR-2	30	50	800

* $\sigma_e \approx (0.3 \sigma_y)$

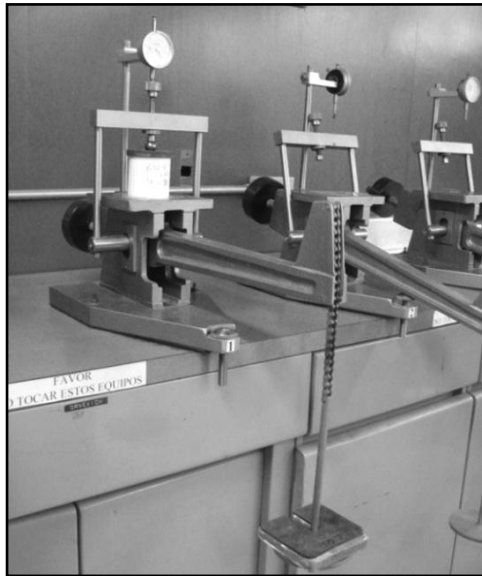


Figura 4.31 Equipo utilizado

4.6.1 Presentación de resultados

Los resultados de las pruebas de creep se presenta en la Figura 4.32. En esta figura se puede observar la evolución de las deformaciones ocurridas en dos muestras de EPS con densidades de 24 y 30 kg/m³ las cuales fueron sometidas a esfuerzos de compresión de 42 y 48 kPa respectivamente, por un periodo aproximado de 800 días.

4.6.2 Análisis de resultados

La Figura 4.32 muestra que al inicio de las pruebas CR-1 y CR-2, se producen deformaciones instantáneas ϵ_i del orden del 0.6% y 1.0% respectivamente, las cuales en este caso son de carácter elástico debido a que los esfuerzos estáticos aplicados son menores al esfuerzo de fluencia. Este tipo de deformaciones pueden estimarse a través de las ecuaciones 4.1 a 4.3 mostradas en el capítulo anterior. Posteriormente, conforme avanza el tiempo, las muestras de EPS experimentan deformaciones ϵ_c debidas a la fluencia lenta o creep del material. En ambas pruebas se observa que la velocidad de las deformaciones por creep disminuye después de transcurrido un periodo de 160 días aproximadamente pasado este tiempo, ambas muestras continúan deformándose presentando una tendencia asintótica. Basados en lo anterior, las deformaciones totales que experimenta el EPS debido a la aplicación de un esfuerzo de compresión en forma sostenida pueden expresarse de la siguiente forma:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_i + \varepsilon_c \quad (4.5)$$

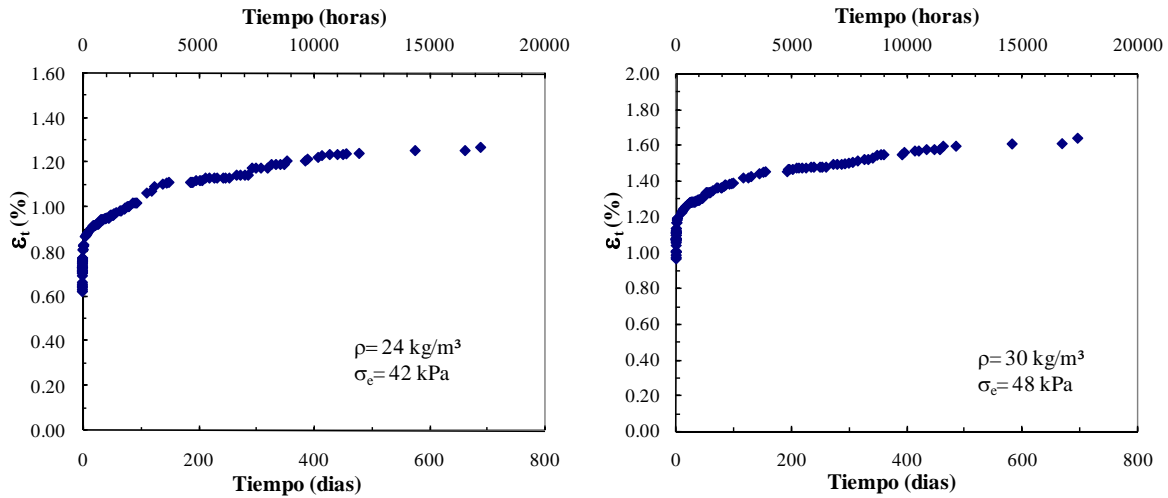


Figura 4.32 Evoluciones de las deformaciones totales

En la Figura 4.33 se presentan las deformaciones por creep obtenidas en las pruebas CR-1 y CR-2. De acuerdo a estos resultados el comportamiento de fluencia lenta de ambas muestras de EPS es bastante similar y esto se debe a que la relación entre el valor mayor y el menor de las densidades es menor a dos y a que en ambos casos el esfuerzo estático aplicado representa una tercera parte del esfuerzo de fluencia del material. Lo anterior está en concordancia con los resultados obtenidos por otros autores y que fueron comentados anteriormente en forma breve.

En la Figura 4.33 también se puede observar, que un gran porcentaje de las deformaciones por creep ocurren durante los primeros 200 días y que tales deformaciones tienden a estabilizarse en el largo plazo, alcanzando valores del orden de un 0.8%. Nótese, que en estos casos la magnitud de deformación por creep es prácticamente similar al límite de deformaciones elásticas para muestras de EPS con densidades de 26 y 30 kg/m³ sometidas a compresión axial (ver Figuras 4.13 a 4.15) y hubiera podido ser mayor en la medida que el esfuerzo estático aplicado se acercara o sobrepasara al esfuerzo de fluencia. Lo anterior indica que la fluencia lenta del EPS es un fenómeno que no debe ser tomado a la ligera, la elección de una densidad de diseño no sólo debe de estar basado en las deformaciones instantáneas inducidas por el esfuerzo de compresión sobre el material, sino también en las deformaciones a largo plazo debidas a la fluencia lenta las cuales dependiendo de la densidad elegida podrían ser mínimas y descartables o sobrepasar por mucho las deformaciones admisibles.

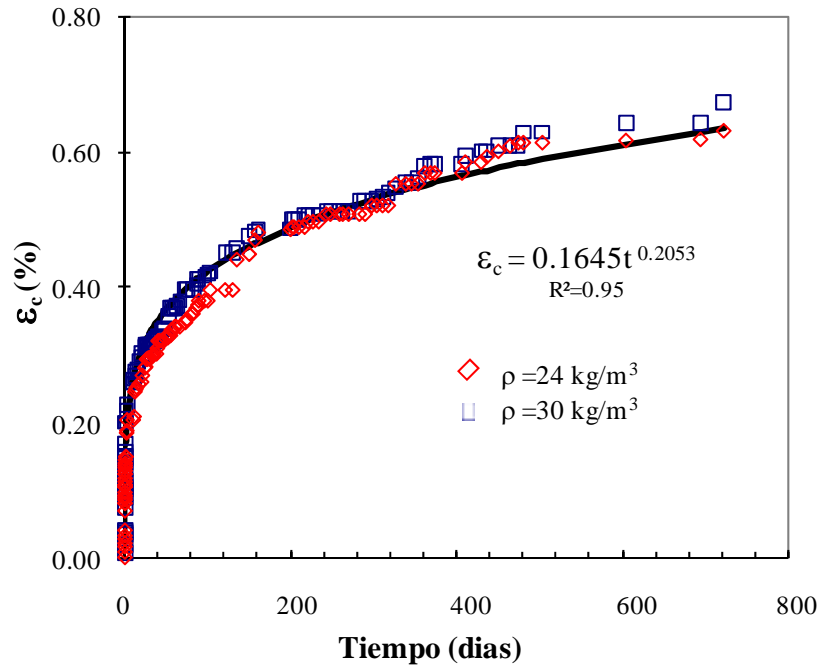


Figura 4.33 Evolución de las deformaciones por creep

Cabe recordar, que de acuerdo a Srirajan et al (2001), las deformaciones que los bloques de EPS presentarían a largo plazo podrían ser menores que las medidas en probetas de laboratorio, debido a que la fluencia lenta del EPS es un fenómeno que depende de la geometría del material.

A la fecha, los estudios realizados para analizar en forma detallada las variables que influyen en el fenómeno de fluencia lenta del EPS continúan siendo pocos y esto probablemente se debe a que el tiempo requerido para la elaboración de las pruebas no es corto. Si bien existen modelos para la estimación de deformaciones planteados bajo conceptos reológicos y empíricos, algunos de ellos no son de fácil aplicación o sus resultados no describen en todos los casos el comportamiento de fluencia lenta de forma aproximada. Por lo tanto, se deben realizar trabajos experimentales adicionales en los cuales se considere un amplio rango de variación de los parámetros que intervienen en este fenómeno, cuyos resultados permitan el planteamiento de nuevos modelos de comportamiento y verificación de algunos existentes.

5 Comportamiento bajo esfuerzos de compresión dinámica

5.1 Introducción

La utilización de los bloques de EPS en aplicaciones geotécnicas emplazadas en zonas sísmicamente activas, así como aquellas aplicaciones que involucren la acción repetida de cargas, requiere del conocimiento detallado del comportamiento de este material ante sollicitaciones dinámicas. A la fecha no hay suficiente información disponible en la literatura acerca de la caracterización y comportamiento dinámico del EPS. Destacan los trabajos realizados por Athanasopoulos et al (1999), Duškov (1997a) y Leo (2001). Por otro lado, autores como Hazarika y Okuzono (2004) Zarnani y Bathurst (2007) construyeron prototipos de laboratorio con el fin de analizar el comportamiento del EPS como inclusión compresible.

Athanasopoulos et al (1999) determinaron las relaciones entre el módulo al cortante G , el amortiguamiento λ , y la deformación angular γ en probetas de EPS bajo condiciones no confinadas en probetas de EPS con densidades de 12.4 y 17.1 kg/m³ y sometidas a frecuencias de carga de 0.01 a 2 Hz.

Duškov (1997a) midió la degradación del módulo de elasticidad dinámico E_{dyn} mediante la realización de pruebas triaxiales cíclicas no confinadas en las que se aplicaron esfuerzos de compresión a frecuencias de 3 y 6 Hz a probetas cilíndricas de EPS con densidad promedio de 19 kg/m³. Adicionalmente este autor calculó relaciones de Poisson del material con en base las medidas de deformaciones axiales en el extremo superior de la muestra y deformaciones radiales en el centro de la misma, para el último ciclo de carga aplicado.

Leo (2001) siguiendo una metodología similar a la realizada por Duškov (1997a), evaluó la degradación del módulo de elasticidad dinámico E_{dyn} , en probetas cilíndricas con densidad de 20 kg/m³, la frecuencia de aplicación de carga en este caso fue de 0.5 Hz.

El número limitado de trabajos hace evidente la necesidad de realizar trabajos de investigación adicionales orientados a determinar el comportamiento dinámico del poliestireno expandido

bajo un rango más amplio de densidades y bajo diferentes condiciones de esfuerzos, que a su vez permitan la formulación y verificación de modelos de comportamiento del EPS.

5.2 Evaluación del comportamiento dinámico del EPS

Con el propósito de mejorar la comprensión del comportamiento dinámico del poliestireno expandido EPS, y de determinar la influencia que en éste ejercen la densidad ρ , el esfuerzo de confinamiento σ_3 , en el módulo de rigidez al cortante G y el amortiguamiento λ , se realizaron pruebas de columna resonante y triaxiales cíclicas en probetas de poliestireno expandido EPS con densidades de 24, 30 y 32 kg/m³, sometidas a esfuerzos de confinamiento de 0 a 60 kPa.

5.2.1 Pruebas de columna resonante

Las pruebas de columna resonante son utilizadas para determinar el módulo de rigidez al cortante G , y el amortiguamiento λ , a deformaciones angulares γ pequeñas ($\gamma < 10^{-2}\%$) de algunos materiales, mediante la aplicación de fuerzas de torsión a probetas cilíndricas de base empotrada sometidas a diferentes condiciones de esfuerzo. En este trabajo se realizaron pruebas de columnas resonante en probetas de poliestireno expandido EPS con $\phi = 3.6$ cm y $h = 8.9$ cm.

Los valores del módulo de rigidez al cortante G , el amortiguamiento λ y la deformación angular γ , se calcularon directamente utilizando las expresiones obtenidas por Hardin (1965) de la teoría de las vibraciones lineales de un cuerpo cilíndrico sometido a torsión.

$$G = \rho V_s^2 \quad (5.1)$$

donde, V_s es la velocidad de propagación de ondas de corte del material, la cual se calcula en función de la frecuencia de resonancia de la probeta y de la geometría del sistema. ρ es la densidad de la probeta de EPS.

$$\lambda = \left(\frac{f_2 - f_1}{2f_n} \right) \quad (5.2)$$

donde, f_n es la frecuencia de resonancia, f_1 y f_2 son las frecuencias correspondientes a un valor de la aceleración $a = a_{m\acute{a}x} / \sqrt{2}$ y $a_{m\acute{a}x}$ es la aceleración correspondiente a la frecuencia de resonancia.

$$\gamma = \frac{1}{3} \frac{\theta}{L} D \quad (5.3)$$

Donde, θ es la distorsión angular, L y D son la longitud y diámetro respectivamente de la probeta.

5.2.2 Pruebas triaxiales cíclicas

La cámara triaxial cíclica es un dispositivo que permite la aplicación de cargas de compresión y extensión axial a una probeta cilíndrica bajo diferentes condiciones de esfuerzo. Mediante el registro del esfuerzo aplicado y la deformación unitaria se calcula el módulo de elasticidad secante y a partir de la teoría de elasticidad el módulo de rigidez al cortante G para una deformación angular γ específica. En esta prueba el rango de deformaciones angulares que se obtiene es del orden de $10^{-2}\%$ a $10^0\%$.

Se realizaron pruebas de compresión cíclica a desplazamiento controlado a probetas de EPS con características geométricas, físicas (densidad) y condiciones de esfuerzo similares a las probetas ensayadas en la columna resonante.

Debido a las características físicas y a la instrumentación de la cámara triaxial, durante cada prueba, se aplicaron amplitudes de 0.3 a 2.0 mm, a una frecuencia de 1 Hz durante 20 ciclos.

Para el cálculo del módulo de rigidez al cortante G , el amortiguamiento λ y la deformación angular γ , se adoptó un modelo lineal equivalente que define estos parámetros de la siguiente forma:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (5.4)$$

donde, E es el módulo de elasticidad secante definido como la pendiente de la línea que une los extremos del lazo de histéresis que describe el comportamiento esfuerzo-deformación de la probeta de EPS, ν es la relación de Poisson la cual depende de la densidad ρ , y el esfuerzo de confinamiento σ_3 . En este trabajo los valores de ν fueron calculados con la ecuación 5.4, y la deformación angular con la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (5.5)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante definido en términos del esfuerzo desviador $\sigma_1 - \sigma_3$, de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (5.6)$$

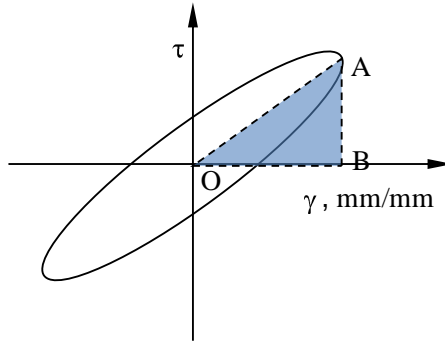


Figura 5.1 Curva esfuerzo-deformación de un ensaye cíclico.

El amortiguamiento λ mide la capacidad que tiene el material para disipar energía y puede expresarse de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{W_D}{4\pi * W_A} \quad (5.7)$$

Donde W_D es el área del ciclo de carga y representa la energía disipada por el material ante la aplicación de un esfuerzo cortante cíclico τ , mientras que W_A es el área del triángulo OAB y representa la energía potencial máxima almacenada por el material.

5.2.3 Presentación de resultados

En la Figura 5.2 se presentan las relaciones entre el módulo de rigidez al cortante G , el amortiguamiento λ y la deformación angular γ , obtenidas a través de pruebas de columna resonante y triaxial cíclica efectuadas en muestras de EPS con densidades de 24, 30 y 32 kg/m³ bajo esfuerzos de confinamiento de 0 a 60 kPa.

5.2.4 Análisis de resultados

En la Figura 5.2 se puede observar que el rango de deformación angular obtenido en todas las pruebas de columna resonante fue del orden de $10^{-4}\%$ a $10^{-1}\%$, mientras que para las pruebas triaxiales cíclicas este valor fue del orden de $10^{-1}\%$ a $10^0\%$.

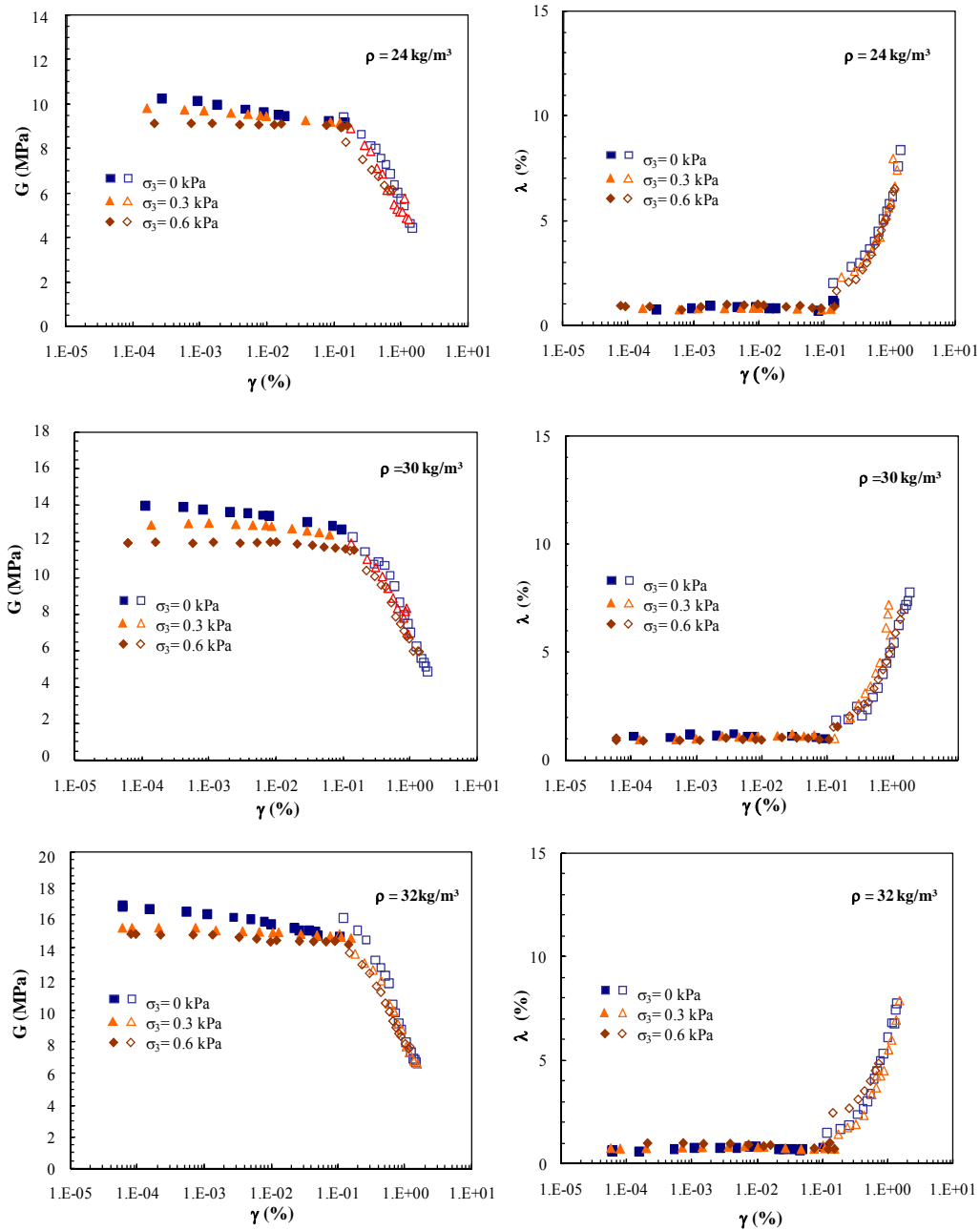


Figura 5.2 Resultados de pruebas de columna resonante y triaxial cíclica.

Al analizar los resultados de las pruebas triaxiales cíclicas se encontró que los valores del módulo de rigidez al cortante G , calculados mediante la ecuación 5.4 diferían de los obtenidos en las pruebas de columna resonante. Para lograr la continuidad de la curva G - γ , fue necesario ajustar los valores de G obtenidos con la prueba triaxial cíclica multiplicándolos por una

constante k que varió entre 1.5 y 2.2 en todos los casos. Athanasopoulos et al. (1999) reportaron esta misma situación para lo cual ellos consideraron ajustar los datos de G utilizando la ecuación 5.4 con valores de la relación de Poisson equivalentes negativos del orden de -0.5 a -0.75. Sin embargo, durante la realización de las pruebas de compresión estática en muestras de EPS reportadas en el capítulo 3 y las pruebas de compresión cíclica aquí mencionadas se observó que para niveles de esfuerzos que sobrepasan el rango elástico del comportamiento del material, las deformaciones radiales son casi imperceptibles. Por lo tanto, al calcular la relación entre las deformaciones radiales y las axiales los valores obtenidos son bajos y positivos es decir, el comportamiento a compresión de la muestra de EPS no es compatible con valores de la relación de Poisson del orden de -0.5 a -0.75 utilizados por Athanasopoulos y otros autores (Athanasopoulos et al, 1999) para la estimación de los valores del módulo al cortante G .

Lo anterior sugiere que la ecuación 5.4 que calcula el módulo al cortante G en función del módulo de elasticidad E y la relación de Poisson ν del material, no es aplicable para el caso de los materiales celulares por lo tanto, en el futuro se deben realizar investigaciones orientadas a determinar una expresión que permita estimar los valores del módulo cortante del EPS a partir de pruebas de compresión. Es importante mencionar, que alternativamente para el rango de deformaciones angulares mayores $10^{-2}\%$, el módulo G se puede obtener de forma directa mediante ensayos de corte simple cíclico. Cabe señalar que en este trabajo de investigación no se realizaron pruebas de este tipo debido a que el equipo de corte simple no se encontraba operando en forma confiable.

En las pruebas triaxiales cíclicas cada amplitud de desplazamiento fue aplicado durante 20 ciclos, los resultados presentados corresponden al ciclo 10. No se observó una influencia significativa del número de ciclos de carga en los resultados. La influencia de la frecuencia de carga no fue analizada en este trabajo de investigación; sin embargo, Athanasopoulos et al, 1999, llevaron a cabo pruebas triaxiales cíclicas a deformación controlada en las cuales se varió la frecuencia de aplicación de la carga, los resultados presentados indican que la frecuencia de aplicación de la carga no afecta de forma significativa los valores del módulo al cortante G , mientras que los valores del amortiguamiento disminuyen en la medida que la frecuencia de carga aumenta.

En la Figura 5.2 se observa un comportamiento cuasi-lineal para deformaciones angulares comprendidas entre $10^{-4}\%$ y $10^{-1}\%$. En este intervalo de deformaciones, los valores de $G_{m\acute{a}x}$ no varían significativamente conforme aumenta la deformación angular y los valores de amortiguamiento λ en todos los casos son del orden del 1%. Para valores de deformación

angular mayores a $10^{-1}\%$, el EPS sufre una degradación de su módulo de rigidez G hasta alcanzar un 50% de su valor máximo y el amortiguamiento λ crece hasta alcanzar valores cercanos al 8%.

Es importante mencionar, que de acuerdo a los resultados reportados por Romo et al (1995), el intervalo de linealidad del comportamiento dinámico de las arcillas de la ciudad de México con índices de plasticidad cercano y mayores al 250%, es coincidente con el intervalo de linealidad del comportamiento dinámico del EPS observado en este trabajo de investigación.

Durante las pruebas triaxiales cíclicas al igual que en las estáticas, ocurrió pandeo de algunas probetas de EPS, siendo este fenómeno más evidente en ciertos casos que en otros. Para disminuir este efecto se utilizaron fronteras deslizantes en los extremos de la probeta, se varió la geometría de las mismas, pero ninguna de estas medidas logró disminuirlo completamente. Lo anterior, se atribuye a errores micrométricos en el careado de la muestra pese a que este proceso que ejecutó con extremo cuidado. En suelos los pequeños errores de careo de la muestra son corregidos por el reacomodo de las partículas al inicio de la prueba de compresión, lo cual no sucede en materiales celulares como el EPS debido a su configuración interna.

5.3 Modelo constitutivo tipo Masing

Los modelos hiperbólicos basados en las reglas de Masing han sido usados para describir el comportamiento esfuerzo-deformación de diferentes tipos de suelos (e.g. Hardin y Drnevich, 1972; Romo et al., 1988; Romo, 1995). Estos modelos permiten establecer relaciones entre la deformación angular γ , el módulo al cortante G y el amortiguamiento λ del material.

De los resultados obtenidos en las pruebas triaxiales cíclicas a deformación controlada y de columna resonante, desarrolladas en este trabajo, se observó una estrecha relación entre el comportamiento dinámico del EPS, su densidad y el esfuerzo de confinamiento que se aplicó durante cada prueba. Por lo anterior, basados en el modelo desarrollado por Romo (1995) se proponen las siguientes expresiones para describir el comportamiento dinámico del EPS.

$$G = (G_{\min} - G_{\max})H(\gamma) + G_{\max} \quad (5.9)$$

$$\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})H(\gamma) + \lambda_{\min} \quad (5.10)$$

$$H(\gamma) = \left[\frac{(\gamma / \gamma_r)^{2B}}{1 + (\gamma / \gamma_r)^{2B}} \right]^A \quad (5.11)$$

donde, γ_r es una deformación de referencia tomada como la deformación correspondiente al 50% del módulo de rigidez máximo, R el coeficiente de correlación; A , B y γ_r son funciones de la densidad del EPS y del esfuerzo de confinamiento, y pueden expresarse de la siguiente forma:

$$A = -0.9961(\sigma_3)^2 + 0.6539(\sigma_3) - 0.0040(\rho)^2 + 0.2180(\rho) - 1.9222 \quad (R^2=0.70) \quad (5.12)$$

$$B = 0.2618(\sigma_3)^2 - 0.0666(\sigma_3) + 0.0041(\rho)^2 - 0.2253(\rho) + 3.6126 \quad (R^2=0.78) \quad (5.13)$$

$$\gamma_r = 0.2590(\sigma_3) + 0.0044(\rho)^2 - 0.2718(\rho) + 5.0912 \quad (R^2=0.84) \quad (5.14)$$

Adicionalmente, mediante los resultados de las pruebas de columna resonante fue posible definir expresiones para describir los valores de los módulos de rigidez máximo G_{\max} y el amortiguamiento mínimo λ_{\min} en función del esfuerzo de confinamiento σ_3 y la densidad del EPS ρ , tal como se muestra a continuación:

$$G_{\max} = -27.8167(\sigma_3) + 0.9615(\rho)^2 - 46.5981(\rho) + 670.2783 \quad (R^2=0.99) \quad (5.15)$$

$$\lambda_{\min} = 0.3606(\sigma_3) - 0.0126(\rho)^2 + 0.6942(\rho) - 8.6442 \quad (R^2=0.94) \quad (5.16)$$

Para poder ajustar el comportamiento del material mediante las ecuaciones 5.9 y 5.10, es necesario al menos tener un estimativo de los valores de G_{\min} y λ_{\max} . Para obtener un valor aproximado a G_{\min} se utilizaron resultados de pruebas de compresión estática realizadas a probetas con densidades similares y ensayadas bajo las mismas presiones de confinamiento utilizadas en las pruebas dinámicas. Se calcularon valores del módulo de elasticidad secantes para grandes deformaciones y con base a ello se estimaron valores de G y γ . En todos los casos se asumió un valor de amortiguamiento igual al 12% como λ_{\max} .

Los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones 5.9 a 5.16 comparados con los resultados experimentales (ver Figura 5.3), muestran que el modelo tipo Masing propuesto en este trabajo predice con buena aproximación el comportamiento dinámico del poliestireno expandido EPS.

5.4 Efectos de carga repetida

El efecto de carga repetida o cíclica es una aspecto importante que debe de tomarse en cuenta cuando los bloques de poliestireno expandido son utilizados como cimentación por ejemplo de cierto tipo de maquinaria o pavimentos, ya que en estos casos el material se ve sometido a un número repetitivo de aplicaciones de carga con intensidad y frecuencia variable que podrían ocasionar la fatiga del EPS y por lo tanto el deterioro de la estructura a la que éste subyace.

Para cada proyecto que se realice y tomando en cuenta las características particulares del mismo tales como frecuencia y amplitud de la vibración en el caso de maquinaria, volumen y tipo de tráfico de diseño para el caso de pavimentos, se deberán de realizar pruebas en las que se analicen la variación de las propiedades del material ante la acción repetida de las cargas.

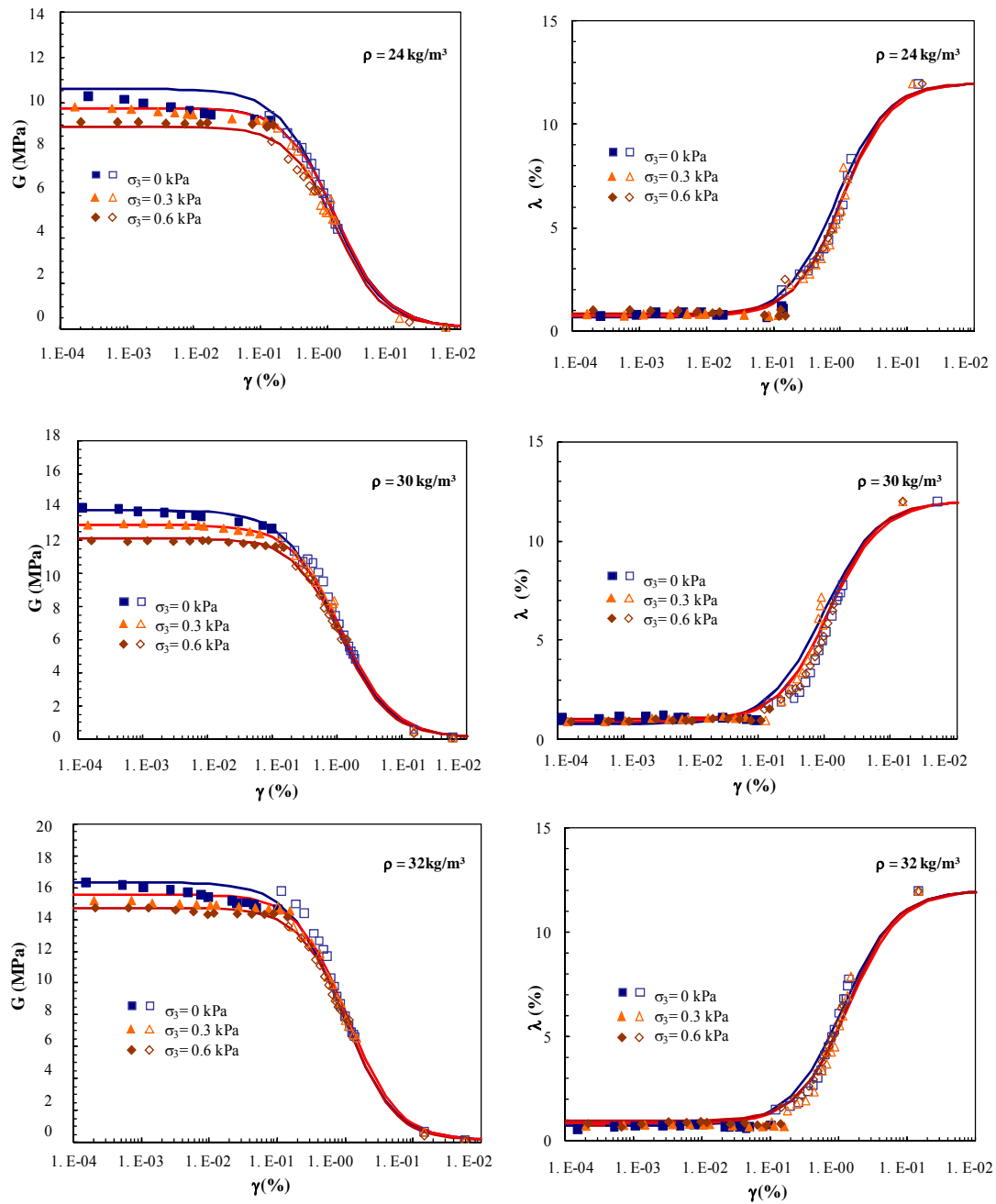


Figura 5.3 Aplicación modelo tipo Masing

En este trabajo de investigación, se realizaron pruebas de compresión triaxial cíclica a deformación controlada en muestras de poliestireno expandido, de densidades de 25 y 30 kg/cm³, sometidas a esfuerzos de confinamiento de 0 y 60 kPa. Las dimensiones de las probetas fueron $\phi=10$ cm y $h=17$ cm. Estas pruebas fueron realizadas con el propósito de determinar la evolución de la deformación máxima axial ϵ_{max} , el módulo E_{dyn} y la relación de Poisson ν , con el número de ciclos aplicados e identificar la influencia que ejercen sobre estos parámetros; la densidad del material, los esfuerzos de confinamiento y las magnitudes de la amplitud de esfuerzo cíclico σ_c y estático inicial σ_e aplicadas durante cada prueba. El número de ciclos aplicados en cada prueba fue de 4000 a una frecuencia de 1 Hz. Para la medición de las deformaciones axiales y radiales de la probeta se utilizó el mismo esquema de sensores ilustrado en la Figura 3.12.

En la Tabla 5.1 se presentan las características de las pruebas realizadas. En cada una de ellas se utilizaron niveles de esfuerzo variables de tal forma que la amplitud de esfuerzo $\sigma_e+\sigma_c$ en un primer caso no superara el esfuerzo de fluencia σ_y del material y en un segundo caso lo igualara.

Tabla 5.1. Características de las pruebas

Prueba	ρ (kg/cm ³)	σ_3 (kPa)	σ_e (kPa)	σ_c (kPa)	$\sigma_e+\sigma_c$ (kPa)	$\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y}\right)$, $\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_y}\right)$	R_e $(\sigma_e+\sigma_c)/\sigma_y$
S1	25	0	0.38	0.29	0.67	0.4, 0.3	0.7
S2	25	0	0.48	0.19	0.67	0.5, 0.2	0.7
S3	25	0	0.67	0.29	0.95	0.7, 0.3	1.0
S4	25	0	0.53	0.43	0.95	0.55, 0.45	1.0
S5	25	60	0.32	0.24	0.56	0.4, 0.3	0.7
S6	25	60	0.40	0.16	0.56	0.5, 0.2	0.7
S7	25	60	0.56	0.24	0.80	0.7, 0.3	1.0
S8	25	60	0.44	0.36	0.80	0.55, 0.45	1.0
S9	30	0	0.71	0.54	1.25	0.4, 0.3	0.7
S10	30	0	0.89	0.36	1.25	0.5, 0.2	0.7
S11	30	0	1.16	0.50	1.66	0.7, 0.3	1.0
S12	30	0	0.91	0.75	1.66	0.55, 0.45	1.0
S13	30	60	0.54	0.41	0.95	0.4, 0.3	0.7
S14	30	60	0.68	0.27	0.95	0.5, 0.2	0.7
S15	30	60	0.95	0.41	1.36	0.7, 0.3	1.0
S16	30	60	0.75	0.61	1.36	0.55, 0.45	1.0

5.4.1 Presentación de resultados.

En las Figuras 5.4 a 5.6, se presenta la evolución de las deformaciones axiales máximas ϵ_{max} , el módulo secante E_{sec} y la relación de Poisson ν con el número de ciclos N , para diferentes niveles de esfuerzos.

Las deformaciones mostradas en la Figura 5.4 corresponden a la deformación máxima medida en la parte superior de la probeta, con la que a su vez se calcularon los valores de la relación de Poisson ν y módulo E_{sec} mostrados en la Figuras 5.5 y 5.6. Los registros de deformaciones axiales medidas en el tercio medio de la probeta fueron omitidos ya que para grandes niveles de deformación los sensores axiales no permanecieron en contacto total con la muestra de EPS, alterándose de esta forma los resultados.

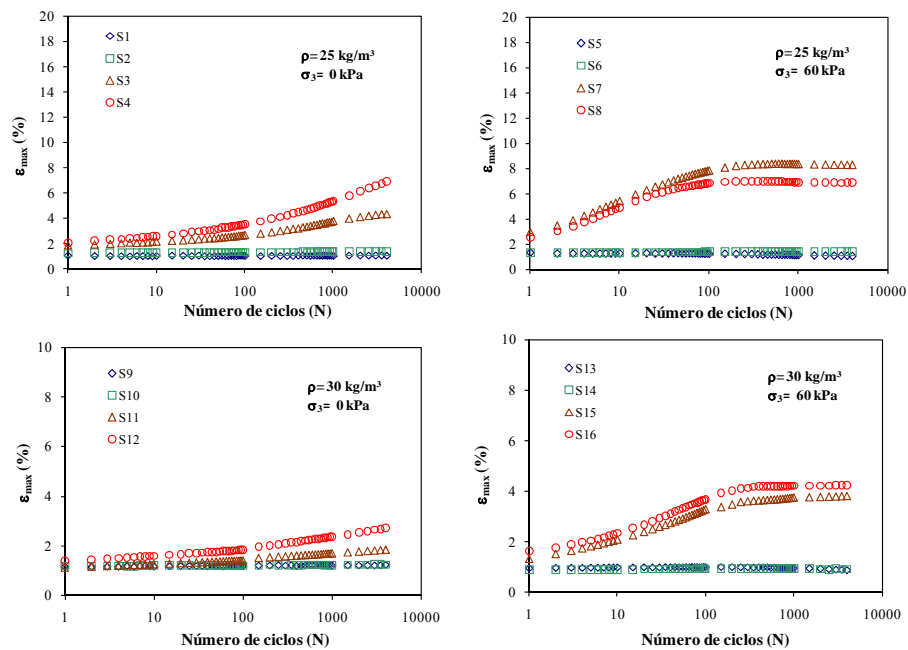


Figura 5.4 Deformación axial máxima ϵ_{max} versus Número de ciclos N

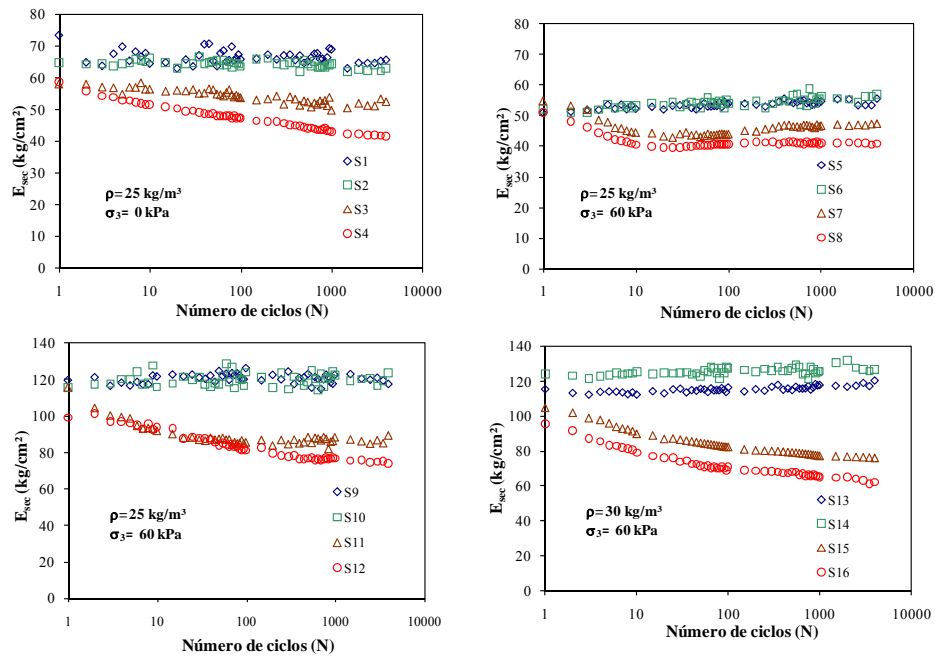


Figura 5.5 Módulo E_{sec} versus Número de ciclos N

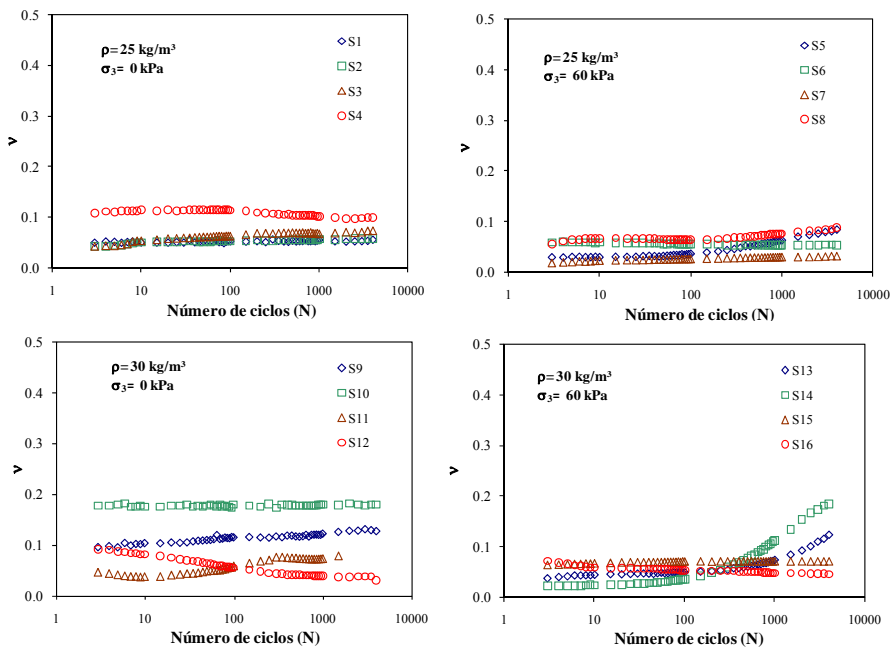


Figura 5.6 Relación de Poisson ν versus Número de ciclos N

5.4.2 Análisis de resultados.

Las pruebas realizadas permitieron analizar la evolución de las deformaciones axiales máximas, el módulo secante E_{sec} y la relación de Poisson ν que presenta el poliestireno expandido EPS de densidad 25 y 30 kg/m³ bajo valores de confinamiento de 0 y 60 kPa, cuando se somete a diferentes esfuerzos en forma repetida.

En la Figuras 5.4 y 5.5 se observa cómo la deformabilidad y la rigidez del material, están estrechamente relacionadas con la densidad y el confinamiento de la probeta. A mayores valores de densidad la rigidez aumenta y la deformabilidad disminuye y por el contrario, cuando el confinamiento aumenta la rigidez disminuye y la deformabilidad tiende a aumentar. Por otra parte, no se observa influencia alguna de la densidad y el esfuerzo de confinamiento aplicado en los valores de la relación de Poisson calculados, tal como se lo muestra la Figura 5.6.

Los valores de deformación axial máxima $\epsilon_{m\acute{a}x}$ y módulo secante E_{sec} presentados en las Figuras 5.4 y 5.5 presentan una relación directa con los valores $R_e = (\sigma_e + \sigma_y) / \sigma_y$ y con el número de ciclos al que se somete la muestra de EPS.

En las Figuras 5.4 a 5.5 se observa que para el caso en el que R_e es igual a 0.7 los valores de $\epsilon_{m\acute{a}x}$ y E_{sec} permanecen prácticamente constantes durante la aplicación de los ciclos de carga y no se observa que la magnitud se afecte por la variación de las relaciones (σ_e / σ_y) y (σ_c / σ_y) .

En la Figura 5.4 se observa que para el caso en que R_e es igual a 1, la deformabilidad del EPS es mayor que en el caso en que R_e es igual a 0.7. Se observa además, que a partir del ciclo número 100 aproximadamente para el caso de cero confinamiento el material empieza a deformarse a una velocidad mayor a la que venía haciéndolo, mientras que para el caso de 60 kPa de confinamiento la velocidad de deformación pasa a ser menor. En esta Figura se observa además que para el caso $R_e=1$ la deformación axial máxima aumenta en la medida en que (σ_c / σ_y) es mayor.

En la Figura 5.4 también se puede observar que para el caso de cero confinamiento las deformaciones axiales muestran una tendencia exponencial, mientras que para el caso de 60 kPa de esfuerzo de confinamiento esta tendencia es asintótica.

La Figura 5.5 muestra que en el caso en que R_e es igual a 1, la rigidez del EPS representada por el valor E_{sec} disminuye en la medida que el número de ciclos aumenta y se ve afectada por la variación de las relaciones (σ_e/σ_y) y (σ_c/σ_y) , se observa una mayor degradación del módulo E_{sec} en los casos en que (σ_c/σ_y) es mayor. Por otro lado se observa que la velocidad con que se degrada el módulo E_{sec} es menor a partir de los 10 ciclos aproximadamente en todos los casos en que $R_e=1$.

En la Figura 5.6 se muestra que no existe una clara influencia de los valores de R_e , las relaciones (σ_e/σ_y) y (σ_c/σ_y) , y el número de ciclos de carga aplicada en los valores de la Relación de Poisson del poliestireno expandido.

6 Conclusiones y comentarios

6.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación se evaluó el comportamiento a la compresión bajo carga estática del poliestireno expandido mediante observaciones microscópicas y macroscópicas. El estudio microscópico del material permitió identificar los mecanismos de deformación que ocurren en la estructura interna del EPS cuando se encuentra bajo esfuerzos de compresión, mientras que el estudio macroscópico permitió determinar que la densidad del EPS, el esfuerzo de confinamiento y la velocidad de desplazamiento son factores que influyen en las relaciones esfuerzo-deformación del material. La resistencia del EPS aumenta conforme lo hacen la densidad del material y la velocidad de desplazamiento y disminuye en la medida que el esfuerzo de confinamiento aumenta. La temperatura es otro factor que influye en el comportamiento compresivo de EPS; sin embargo, sus efectos no fueron estudiados en este trabajo.

Al evaluar el comportamiento a la compresión bajo carga dinámica del EPS se observó que los valores del módulo de rigidez al cortante son sensibles a los cambios de densidad y esfuerzo de confinamiento. Ante un aumento en la densidad del EPS los módulos de rigidez al cortante aumentan. Por otro lado, estos disminuyen cuando el esfuerzo de confinamiento es mayor. Las variaciones en el esfuerzo de confinamiento y la densidad no afectan significativamente los valores del amortiguamiento del material. La influencia de la frecuencia de aplicación de carga en las propiedades dinámicas del EPS no fue analizada en este trabajo. Sin embargo, Athanasopoulos et al. (1999) demostraron que los valores de amortiguamiento disminuyen conforme aumenta la frecuencia de aplicación de carga.

Los resultados de las pruebas realizadas para determinar el comportamiento a compresión del EPS bajo condiciones estáticas y dinámicas mostraron que a diferencia de los suelos, el esfuerzo de confinamiento ocasiona una disminución en la resistencia a la compresión del poliestireno expandido. Basados en las observaciones microscópicas se planteó la hipótesis de que este fenómeno obedece a que las presiones de confinamiento deforman volumétricamente estructura celular del material la cual toma una forma reentrante debido al pandeo y flexión de sus elementos haciéndola menos resistente. Adicionalmente, debido a la compresión

volumétrica de la estructura celular y por lo tanto de cada perla de EPS ocurre un debilitamiento de las ligas de contacto entre las perlas, lo cual influye aún más en la pérdida de resistencia del material.

La influencia de los esfuerzos de confinamiento en la resistencia a la compresión de los bloques de EPS es un aspecto que debe ser tomado en cuenta en el diseño de soluciones a problemas geotécnicos ya que el descartar sus efectos no conduce a resultados conservadores como lo podría ser para el caso de los suelos, y es una de las principales causas de fracaso en la utilización de bloques de EPS en proyectos geotécnicos

Los modelos de comportamiento a compresión bajo carga estática y dinámica propuestos en este trabajo predicen con buena aproximación el comportamiento del material. Sin embargo, estos modelos presentan ciertas limitaciones al ser propuestos con base en pruebas de laboratorio realizadas a muestras de EPS para un rango limitado de densidades, esfuerzos de confinamiento, velocidades de desplazamiento para el caso del modelo bilineal y frecuencias de carga para el caso del modelo tipo Masing. Para superar estas limitaciones se deben realizar pruebas de laboratorio adicionales que permitan en caso de ser necesario realizar ajustes a los modelos con el propósito de mejorar la precisión de sus estimaciones. En todo caso, las ecuaciones de comportamiento aquí propuestas son un marco de referencia para el desarrollo de futuros modelos.

Existe una notable influencia de las características viscosas del aire y de las membranas de poliestireno que conforman la estructura interna de los bloques de EPS, en la resistencia a la compresión del material. Bajo condiciones estáticas esta influencia se ve reflejada a través de la fluencia lenta o creep del material y de la variación de la resistencia con la velocidad de desplazamiento. En las pruebas de compresión dinámica las características viscosas del EPS se reflejan en la variación de los valores del amortiguamiento conforme lo hace la frecuencia de aplicación de carga.

La estructura celular del poliestireno expandido presenta un cierto grado de auxeticidad que explica los valores bajos de las relaciones de Poisson del material. Cabe anotar que los valores de las relaciones de Poisson reportados en este trabajo de investigación deberán de ser tomados en cuenta como una medida de orden de magnitud debido a la dificultad de medir con precisión las deformaciones radiales en las muestras de EPS debido a la presencia de pandeo la mayoría de los casos.

El peso de un bloque de EPS sumergido en agua puede aumentar debido a la absorción de agua. Los resultados de las pruebas de absorción realizados en este trabajo de investigación indican que en el largo plazo este material puede absorber cantidades de agua hasta del 20% de su volumen inicial. En términos prácticos el material continúa siendo liviano por lo tanto su uso como relleno aligerante no se modifica por esta condición. Sin embargo, se deben de realizar investigaciones adicionales que permitan cuantificar los porcentajes de absorción de muestras de EPS de diferentes densidades y sometidas a diferentes niveles de esfuerzos de confinamiento así como evaluar los efectos de la presencia de agua al interior de la probeta en la resistencia del material.

6.2 Comentarios

El poliestireno expandido EPS es una espuma plástica ligera, cuyas características de resistencia a la compresión en condiciones estáticas y dinámicas son muy similares a las de los suelos. La energía absorbida por una muestra de EPS cuando se somete a esfuerzos por compresión se disipa a través de dos mecanismos que ocurren de forma simultánea, el primero de ellos está asociado a las paredes de la estructura celular y el segundo con el aire encapsulado en su interior.

Las propiedades físicas y mecánicas del poliestireno expandido permiten utilizarlo como alternativa de solución de diferentes problemas geotécnicos entre los que figuran la construcción de estructuras de retención y terraplenes livianos, cimentación sobre suelos compresibles, estabilización de taludes, reemplazo de suelos, entre otros.

El uso de materiales celulares para aplicaciones geotécnicas comúnmente llamados *geofoms* no es nuevo. Existe la tendencia marcada de analizar el comportamiento mecánico de estos materiales dentro del enfoque de los sólidos homogéneos dadas las simplificaciones que esto conlleva. Sin embargo, tal como se ha demostrado en este trabajo de investigación, algunos aspectos del comportamiento de los sólidos celulares difieren con respecto a los de los sólidos homogéneos y en ocasiones contradicen el sentido común que hemos desarrollado a través de las experiencias con los materiales utilizados tradicionalmente. Lo anterior indica que el entendimiento de la mecánica de los sólidos celulares es indispensable en la concepción de soluciones geotécnicas que involucren a estos materiales.

Referencias bibliográficas.

- Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C. and Xenaki, V.C., 1999, "Dynamic Properties of EPS Geofoam: An Experimental Investigation", *Geosynthetics International*, Vol. 6, No. 3, pp. 171-194.
- Atmatzidis, D. K., Chrysikos, D. A., Missirlis, E. G.(2005). Laboratory testing and modelling of EPS geofoam in compression. *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Torino, Italia.
- Aytekin M. (1997). Numerical modeling of EPS geofoam used with Swelling Soil. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 15, No. 1 a 3, pp. 133-146.
- Bathurst, R. J., Zarnani, S., Gaskin, A. (2007a). Shaking table testing of geofoam Seismic Buffers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27. No. 4, pp. 324-332.
- Bathurst, R. J., Keshavarz, A., Zarnani, S. ,Take, A. (2007b). A simple displacement model for response analysis of EPS geofoam seismic buffers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27. No. 4, pp. 344-353.
- Chun, B.S., Lim, S.H., Sagong, M.S., Kim, K. (2004). Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests. *Geotextiles and Geomembranes* 22, 223–237.
- Duškov, M. (1997a). Materials Research on EPS-20 and EPS-15 under representative conditions in pavement structures. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 15, No. 1 a 3, pp. 147-181.
- Duškov, M. (1997b). Measurements on a flexible pavement structure with an EPS geofoam sub-base. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 15, No. 1 a 3, pp. 5-27.
- Duškov, M., Scarpas, A. (1997). Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements with an (open joint in the) EPS sub-base. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 15, Nos. 1, 2, and 3, pp. 29-38.
- Elragi, A., Nigussey, D., and Kyanka, G. (2000) Sample size effects on the behavior of EPS geofoam. *Proceedings of the Soft Ground Technology Conference*, ASCE Geotechnical Special Publication 112, Noordwijkerhout, The Netherlands.
- Findley, W. N., Khosla, G. (1956). An equation for tension creep of three unfilled thermoplastics. *SPE Journal*, Vol. 12, pp. 20-25.

- Gibson, L. J., Ashby, M. F. (1999). Cellular solids. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- Hazarika H., Okuzono S. (2004). On a performance enhancement of a soil-structure system with sandwiched inclusion. *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and the 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp. 257-263.
- Hazarika H. (2006). Stress-strain modelling of EPS geofom for large-strain applications. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 24, No. 2 pp. 79-90.
- Horvath, J.S. (1995). Geofom geosynthetic. Horvath Engineering, P.C. Scarsdale, New York, USA, 217 p.
- Horvath, J.S. (1997). The Compressible inclusion function of EPS geofom. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 15, No. 1 a 3, pp. 77-119.
- Horvath, J.S. (1998) "Mathematical Modeling of the Stress-Strain-Time Behavior of Geosynthetics Using the Findley Equation: General Theory and Application to EPS-Block Geofom", Manhattan College Reserch Report No. CE/GE-98-3, Bronx, N.Y
- Lakes, R.S. (1987). Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, Vol. 235, pp.1038-1040.
- Leo Y. (2001). Behavior of the expanded polystyrene (EPS) geofom on soft soil. Ph. D Thesis, School of Civil Engineering and Environment. The University of the Western Sydney Nepean.
- Masso Moreu, Y, Mills, N.J. (2004). Rapid hydrostatic compression of low-density polymeric foam. *Polymer Testing*, Vol. 23, pp. 313–322.
- Murphy, G., (1997). The Influence of Geofom Creep on the Performance of a Compressible Inclusion. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 15, No. 1 a 3, pp. 121-131.
- Negussey, D., Jahanandish, M. (1993). Comparison of some engineering properties of expanded polystyrene with those of Soils. *Transportation Research Record*, No. 1418, pp. 43-48.
- Negussey, D. (1998). Putting polystyrene to work. *Civil Engineering*, ASCE, March 1998, pp. 65-67.
- Ouellet S., Cronin, D., Worswick, M. (2006). Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions. *Polymer Testing*, Vol. 25, No. 6, pp 731-743.
- Ossa A., Romo M.P. (2008). A model for EPS dynamic shear modulus and damping ratio. *The First Panamerican Geosynthetics Conference, Geoamericas 2008*, Cancún, México.
- Preber, T., Bang, S., Chung, Y., and Cho, Y. (1994). *Transportation Research Record*, No. 1462, pp. 36-46.

- Peralta, R., Turcott E. (1980). Investigación teórico-experimental sobre la relación entre microestructura y comportamiento mecánico en suelos arcillosos. *Informe del proyecto 9107 II-UNAM*, Instituto de Ingeniería.
- Peralta, R (1984). Aspectos Microestructurales del Subsuelo de la Cd. de México. *Informe del proyecto 2549 II-UNAM*, Instituto de Ingeniería.
- Romo, M.P. (1995). Clay behaviour, ground response and soil-structure interaction studies in Mexico City. *Proceedings :Third international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics*, Vol. II, St. Louis Missouri, USA, pp. 1039-1051.
- Rossacci, J., Shivkumar, S. (2003). Bead fusion in polystyrene foams. *Journal of Materials Science*, Vol.38, No. 2.
- Sheeley, M., Negussey, D. (2000). An investigation of geofoam interface strength behavior. *Soft Ground Technology Conference*, ASCE Geotechnical Special Publication 112.
- Srirajan, S., Negussey, D., Anasthas, N (2001). Creep behavior of EPS geofoam *Proceedings of the Third International Conference on EPS—EPS Geofoam* . Salt Lake City, USA.
- Vaitkus, S., Laukaitis, A., Gnipas I., Kersulis, V., Vejelis, S. (2006). Experimental analysis of structure and deformation mechanisms. *Materials Science (Medziagotyra)*, Vol. 12, No. 4., pp 323-327.
- Wong, H., Leo, C.J. (2006). A simple elastoplastic hardening constitutive model for EPS geofoam" *Geotextiles and Geomembranes* Vol. 24, pp. 299-310.
- Zarnani, S., Bathurst J. (2007). Experimental investigation of EPS geofoam seismic buffers using shaking table tests. *Geosynthetics International*, Vol. 14, No. 3, pp. 165-177
- Zou, Y., Leo, C.J. (1998). Laboratory studies on the engineering properties of expanded polystyrene (EPS) material for geotechnical applications. *Proceedings: Second International Conference on Ground Improvement Techniques*, Singapore, pp. 581–588.