

Estudio experimental del comportamiento tensión-deformación de poliestireno expandido de alta densidad en compresión triaxial

V. A. Rinaldi, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. vrinaldi@unc.edu.ar

P. A. Covassi, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. pedro.covassi@unc.edu.ar

RESUMEN

El uso de geosintéticos es uno de los avances más importantes de las últimas décadas. Entre las diferentes familias de geosintéticos, el poliestireno expandido de alta densidad (*EPS* por su acrónimo en inglés) están ganando difusión en el campo de la geotecnia en varias aplicaciones como: la reducción del peso de los terraplenes, reducción de los esfuerzos sobre muros de contención, el aislamiento de las estructuras sobre suelos expansivos, como amortiguadores para cargas sísmicas, etc. aprovechando su bajo peso específico y una alta compresibilidad. Este trabajo presenta los resultados de un programa experimental basado en varias pruebas realizadas en un dispositivo de compresión triaxial cúbico sobre muestras de EPS. Los resultados muestran que este tipo de material tiene un comportamiento mecánico complejo en los parámetros de deformación y resistencia al corte, lo cual es importante a considerar en el diseño de obras geotécnicas que incorporen su uso.

ABSTRACT

The use of geosynthetics is one of the most important advances in recent decades. Among the different families of geosynthetics, the high-density expanded polystyrene foams (*EPS*) are gaining diffusion in the field of geotechnics in several applications like: reducing the weight of embankments, reducing stresses on retaining walls, insulation of structures on expansive soils, as dampers for seismic loads, etc. taking advantage of its low unit weight and high compressibility. This paper presents the results of an experimental program based on several tests performed in a triaxial compression on EPS samples using a cubical triaxial device. The results show that this type of material has a complex mechanical behavior on deformation and shear strength parameters, which is important to be considered when the design of geotechnical works.

Keyword: EPS Geofoam, Flexible Boundaries, Lightweight inclusions, Stres-Strain Behavior, True triaxial

1. INTRODUCCIÓN

El poliestireno expandido (*EPS*) es una espuma celular rígida fabricada con forma de planchas o bloques. El poliestireno se produce a partir de la resina estireno (Koerner, 2005 y Lin *et al.*, 2010)]. La microestructura de los bloques de *EPS* está constituida por esferas de poliestireno expandido que están tangencialmente unidas por la fundición del mismo material que las compone. Asimismo, estas esferas están compuestas por una gran cantidad de celdas cerradas que se generan durante el proceso de fabricación. Cuando se somete a una probeta de *EPS* a compresión, la estructura que forman las paredes de las celdas cerradas se deforma por flexión, pandeo, fractura y punzonado, provocando que el aire encerrado en su interior se comprima y salga expulsado al exterior (Ossa y Romo, 2009).

En la práctica de la Ingeniería Geotécnica, el *EPS* se utiliza como un material elegido para reemplazar otros materiales convencionales en situaciones donde sus propiedades físicas y mecánicas representan una ventaja. Uno de sus principales usos es el alivianamiento en estructuras de terraplenes sobre suelos blandos, como consecuencia de su extremada baja densidad (Arellano y Stark, 2009; Akay, 2016; Özer, 2016). Otro atributo del *EPS* radica en que, cuando este material es sometido a una carga desviadora de compresión, el mismo experimenta tanto una expansión lateral como contracción volumétrica prácticamente nulas, lo que provoca que las presiones horizontales inducidas sean significativamente menores a las que producirían los suelos. Este tipo de comportamiento hace que éste material pueda utilizarse como una inclusión compresible detrás de estructuras de retención para reducir cargas de empujes (Horvath, 1997, 2000; Zou *et al.*, 2000; Hazarika y Okuzono, 2004; Hatami y Witthoeft, 2008; Lutenegger y Ciufetti, 2009; Horvath, 2010; Witthoeft y Kim, 2016; Liyanapathirana y Ekanayake, 2016).

Distintos autores han demostrado los bloques de *EPS* tiene un comportamiento mecánico muy diferente al de los suelos. Debido a esto, resulta fundamental poder desarrollar tanto programas de caracterización en laboratorio como modelos

constitutivos que representen dicho comportamiento en forma adecuada, a los fines de poder desarrollar métodos de predicción de comportamiento de distintas estructuras.

El objetivo principal de este artículo es caracterizar el comportamiento tensión-deformación de un tipo de *EPS* mediante la ejecución de un programa experimental en laboratorio. Para ello, se presenta un resumen del programa experimental ejecutado con un dispositivo triaxial cúbico de paredes flexibles y se resumen los principales resultados y análisis obtenidos.

2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS MÁS RELEVANTES

2.1 Densidad

La densidad del *EPS* se considera como la propiedad índice principal entre todas sus propiedades. La resistencia a la compresión, resistencia al corte, resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, rigidez, comportamiento en fluencia lenta (*creep*) y otras propiedades mecánicas, dependen directamente de la densidad (Horvath, 1994; Preber *et al.*, 1995; Chun *et al.*, 2001; Hazarika, 2006; Ossa y Romo, 2009). Asimismo, el costo de fabricación de un bloque de *EPS* se considera linealmente proporcional a su densidad. Por último, las propiedades no mecánicas tales como la aislación térmica y aislación acústica también dependen de la densidad del *EPS*. Las densidades del *EPS* más utilizadas con fines prácticos en la Ingeniería Civil oscilan entre 11 kg/m³ y 30 kg/m³. Estos valores de densidades que rondan entre el 0,6 al 2,5 % del peso típico de un suelo compactado (Koerner, 2005).

2.2 Resistencia a la compresión y curva tensión-deformación

La medición de resistencia a la compresión de probetas de *EPS* está regulada según las especificaciones de la norma ASTM C165 ó D1621. Estas normas exigen la ejecución de ensayos de compresión sobre probetas cúbicas de 50 mm de lado aplicando una velocidad de deformación del orden de 5 mm/min (10 %/min) para el caso de ejecución de ensayos a deformaciones controladas. En la Figura 1 se presenta una curva tensión-deformación de una probeta de *EPS* sometida a compresión. Como puede apreciarse, esta clase de material no posee un tipo de falla como la de otros materiales sólidos comúnmente utilizados en la construcción (acero, madera, hormigón) manifestándose en forma de una rotura física del material cuando se lo somete a una carga uniforme. Asimismo, su comportamiento tampoco se asemeja al de los suelos u otro material granular donde se producen desplazamientos y deslizamientos entre partículas y se desarrolla un estado de tensión residual a niveles grandes de deformaciones. Por el contrario, el comportamiento del *EPS* posee un endurecimiento continuo a medida que se deforma, pudiéndose dividir en cuatro zonas bien diferenciadas: (1) una zona inicial con respuesta lineal, (2) una zona de fluencia, (3) una zona de endurecimiento lineal, (4) una zona de endurecimiento no lineal.

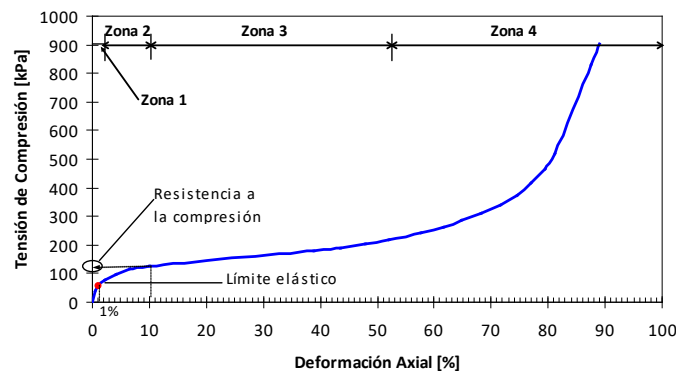


Figura 1. Comportamiento en compresión simple de una probeta de EPS de 21 kg/m³ (Horvath, 1997).

La Zona 1, con respuesta lineal, se extiende normalmente hasta deformaciones entre el 1,0 y 1,5 % (Horvath, 1994, 1997) dependiendo de la densidad del material ensayado. Esta zona puede caracterizarse mediante el uso del módulo tangente inicial (E_{ti}) y considerarse que satisface la ley de Hooke (Ossa y Romo, 2009). En la Zona 2, se caracteriza por poseer un endurecimiento no lineal debido al comienzo de la flexión y pandeo de las paredes de las celdas cerradas que conforman al *EPS*, causando una disminución de la rigidez inicial (E_{ti}) hasta llegar a un valor de rigidez plástica (E_p) que caracteriza el tramo lineal de la Zona 3. En este tercer tramo de la curva, se disipa una gran cantidad de energía a través de la expulsión del aire que hay en el interior de las celdas, pandeo de las paredes de las celdas, formación de rótulas plastificadas, y hasta la formación de fisuras que se propagan horizontalmente. Esta zona se extiende hasta valores de deformación del orden del 40 % al 70 %. En la Zona 4 la estructura celular del material colapsó y forma una estructura

laminada donde las paredes opuestas de las celdas se encuentran altamente deformadas y en consecuencia terminan arrugándose. A medida que las deformaciones se incrementan, el comportamiento sigue siendo de endurecimiento ya que por naturaleza la estructura tenderá a regresar desde su estado de poliestireno expandido a su estado de poliestireno sólido.

Si bien el comportamiento tensión-deformación representado en la Figura 2 se considera como representativo de bloques de EPS en términos cualitativos, existen diferentes factores que afectan la respuesta mecánica de este material. La resistencia y la rigidez están directamente relacionadas con la densidad del material. A mayor densidad del material, mayor su resistencia y rigidez inicial. Asimismo, el aumento de temperatura disminuye la resistencia y la rigidez. Otro factor relevante es la velocidad de deformación durante la ejecución de los ensayos, la cual tiene un efecto importante en la rigidez y resistencia. A mayor velocidad de deformación, mayor la resistencia y rigidez inicial desarrollada. Elragi *et al.* (2000), demostraron el efecto del tamaño de la muestra ensayada sobre el módulo inicial. A mayor tamaño de la muestra ensayada, mayor rigidez inicial. Asimismo, el tamaño de las esferas de EPS que conforman una muestra no afecta el comportamiento mecánico de este tipo de material medido en laboratorio (Elragi, 2006).

2.3 Comportamiento dependiente del tiempo (fluencia lenta)

La aplicación de cargas sostenidas en el tiempo sobre una muestra de EPS resulta en la respuesta con comportamiento por fluencia lenta que se muestra en la Figura 3 (Negussey, 1997). Este comportamiento es típico en materiales viscoelásticos como los polímeros, entre los que se encuentra el EPS. El comportamiento mecánico bajo carga sostenida presenta deformaciones por fluencia lenta primaria, secundaria y terciaria (Koerner, 2005). Asimismo, en este tipo de material, a mayor tensión constante aplicada, mayor es el efecto de la fluencia lenta en las deformaciones a través del tiempo (Figura 2).

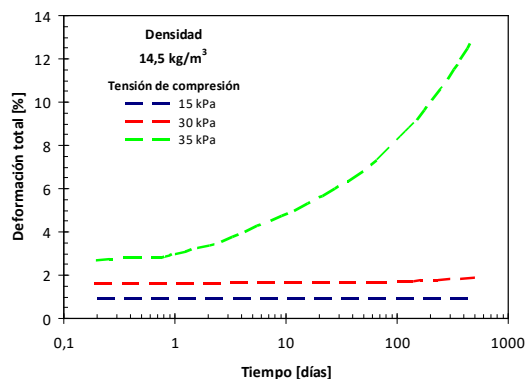


Figura 2. Comportamiento en fluencia lenta del un bloque de EPS de 23,5 kg/m³ (Horvath, 1997).

2.4 Resistencia a la tracción y flexión

Tanto la resistencia a la tracción como a la flexión son considerados como indicadores de calidad durante la construcción del material. La resistencia a la tracción es un indicador de la calidad de la fusión entre esferas de EPS. La resistencia a la flexión se calcula asumiendo que el material tiene un comportamiento lineal elástico hasta llegar a la falla.

2.5 Resistencia al corte

Existen numerosos aspectos a considerar sobre la resistencia al corte de bloques de EPS: resistencia al corte interna, resistencia al corte externa entre interfaces de bloques de EPS, y externas entre bloques de EPS y superficies de otros materiales tales como el suelo, hormigón y otros tipos de geosintéticos (típicamente geotextiles y geomembranas). Sheeley y Negussey (2001), realizaron un estudio completo sobre la interacción entre bloques de EPS y distintos materiales, determinando que el comportamiento al deslizamiento entre dos superficies de EPS sometidas a cargas normales con magnitudes dentro de rangos de interés práctico, desarrolla tanto resistencia de pico como residual. El efecto de la variación de la densidad en la resistencia al deslizamiento es despreciable para este caso. Los valores de coeficientes de fricción obtenidos para este caso variaron entre 0,65 y 0,50. La interfaz formada entre dos superficies de EPS y hormigón colado poseen una mayor resistencia al deslizamiento que el caso EPS-EPS, desarrollando también resistencia de pico y residual. Para el caso de una interfaz formada por superficies de EPS y una geomembrana, es mucho menor a las resistencias desarrolladas en los dos casos anteriores.

3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Existen distintos aspectos a considerar en el diseño de una estructura geotécnica que involucra el empleo de *EPS* como material. Estos aspectos pueden resumirse en dos grupos: externos e internos. Los aspectos de diseño externo son todos los relacionados con el comportamiento global de la estructura e incluyen, por ejemplo, el análisis de cargas, evaluación de la estabilidad global de la estructura, análisis de resistencia y deformación elástica y por consolidación del suelo de fundación, etc. Los aspectos de diseño interno, están vinculados al análisis del comportamiento inter-elementos e intra-elementos. Ejemplos de análisis de comportamiento inter-elementos pueden ser la interacción entre superficies de bloques de *EPS* adyacentes, superficies de bloques de *EPS* y suelo, suelos de bloques de *EPS* y otros geosintéticos, interacción entre bloques de *EPS* conectados con grampas de fijación, etc. Los aspectos de diseño interno intra-elementos son los asociados al comportamiento del material en sí mismo, considerado como un medio homogéneo y continuo, a los cuales está enfocado el presente trabajo.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 *Poliestireno expandido utilizado*

En este trabajo se ensayaron probetas de espuma de poliestireno expandido de 16 kg/m^3 . Las probetas consistieron en cubos de 80 mm de lado que fueron cortados de una plancha de tamaño comercial de 80 mm de espesor, 1000 mm de ancho y 1500 mm de largo. El corte de las probetas se efectuó utilizando un alambre caliente de 0,1 mm de diámetro conectado a un regulador de electricidad. En la Figura 3 se presentan dos fotografías de una de las probetas previo y posterior a ensayar respectivamente.

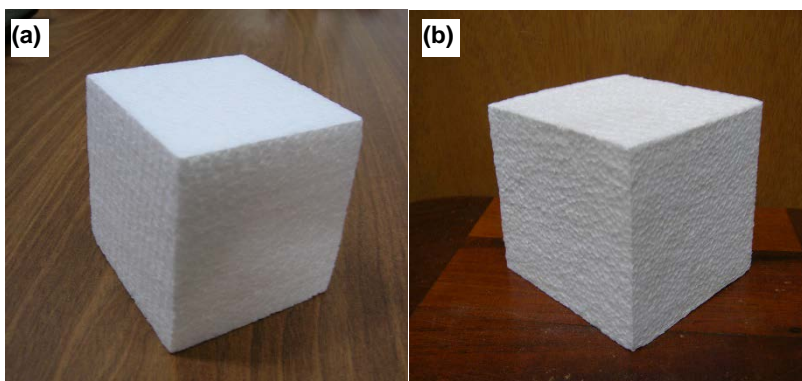


Figura 3. Fotografías de una probeta de EPS de 16 kg/m^3 utilizada en este trabajo. (a) previo a ensayar y (b) posterior a ensayar.

4.2 *Equipo triaxial cúbico*

En este trabajo se utilizó un dispositivo triaxial cúbico desarrollado en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba. El mismo se trata de un dispositivo con contornos flexibles, utilizando seis membranas flexibles de látex para la aplicación de tres esfuerzos principales controlados en tres direcciones ortogonales independientes entre sí, sobre una probeta cúbica de 80 mm de lado. El dispositivo está compuesto por dos partes principales: una celda triaxial, y los dispositivos periféricos que controlan y monitorean el funcionamiento de la misma. La celda triaxial está constituida por un marco de reacción, seis membranas flexibles para la aplicación de cargas y seis placas de cierre. Los componentes periféricos que completan el dispositivo son un panel de control neumático para la aplicación de cargas en tres direcciones independientes, un panel de control para saturación de la probeta, un sistema de acondicionamiento automático de señales y de adquisición de datos y un procesador PC para el almacenamiento y post-procesamiento de los mismos. En la Figura 4 se presentan tres fotografías ilustrativas de distintos componentes del dispositivo triaxial cúbico. Para más detalles del equipo utilizado y su calibración puede consultarse los trabajos de Covassi y Rinaldi (2012, 2015 y 2019). Cabe destacar que no se ha encontrado referencias en la bibliografía el empleo de este tipo de dispositivos de contornos flexibles (con aplicación de carga por deformaciones controladas) para la caracterización de materiales como el *EPS*. El único registro en la bibliografía del empleo de dispositivos similares al descrito en este trabajo es el de la investigación presentada por Yin *et al.* 2010, quienes utilizaron un dispositivo triaxial que permite la aplicación de carga en tres direcciones en forma independiente mediante contornos mixtos (flexibles y rígidos). En este caso la aplicación del esfuerzo desviador se realizó mediante los contornos rígidos aplicando control en las tensiones a una velocidad de 75 kPa/min .

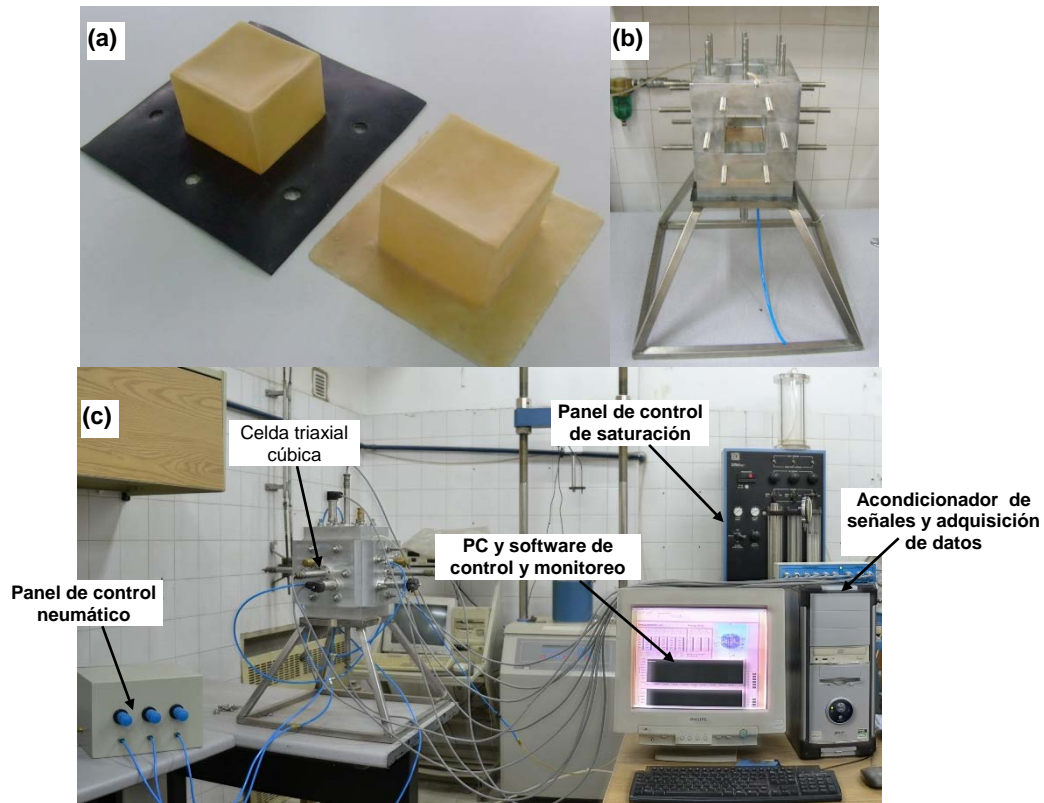


Figura 4. Fotografías ilustrativas del dispositivo triaxial cúbico empleado en este trabajo. **(a)** membranas flexibles de látex; **(b)** marco de reacción de la celda triaxial y **(c)** configuración del dispositivo ensamblado completamente durante un ensayo.

4.3 Ensayos experimentales

Se ejecutaron una serie de ensayos de compresión isotrópica (CI) y ensayos de compresión triaxial convencional (CTC) consolidados drenados sobre distintas probetas de *EPS*. La aplicación de la carga durante estos ensayos se ejecutó a tensiones controladas, debido a la naturaleza del dispositivo triaxial cúbico empleado. Durante los ensayos, se mantuvieron abiertos los puertos de drenaje de la celda triaxial cúbica en toda su duración, a los fines de permitir la salida del aire que expulsaban las muestras de *EPS* al ser comprimidas (condición drenada).

Para el caso del ensayo de compresión isotrópica (CI), se ejecutó realizando saltos de carga de 5 kPa cada uno hasta alcanzar la presión máxima de 90 kPa. En cada incremento de carga efectuado se midieron los desplazamientos experimentados por la probeta en cada una de sus seis caras, permitiendo calcular tanto las deformaciones en cada dirección principal (x , y , z) como volumétricas. Asimismo, en cada incremento de carga se esperó que las deformaciones se establecieran con el tiempo para luego proseguir inmediatamente con un nuevo incremento de presión y evitar efectos de fluencia lenta en las mediciones realizadas. El tiempo que demandó la estabilización de las deformaciones para cada salto nunca superó los 60 segundos. Posteriormente, una vez alcanzado los 90 kPa de carga isotrópica, se procedió a descargar la muestra en decrementos de 5 kPa, operando de la misma manera que para los incrementos de carga, hasta llegar al valor de presión isotrópica de 1 kPa.

Por otro lado, se realizaron seis ensayos de compresión triaxial convencional drenada sobre seis probetas de *EPS*. Las presiones de confinamiento utilizadas fueron de 15; 30; 45; 60; 75 y 90 kPa respectivamente. Los ensayos consistieron de dos etapas: compresión isotrópica drenada y compresión triaxial convencional drenada. En la etapa de compresión isotrópica, se aplicó un esfuerzo isotrópico en incrementos de 5 kPa, operando de la misma manera que para el ensayo de CI. Luego, se procedió a ejecutar la etapa de corte triaxial drenado. En esta etapa, el esfuerzo desviador se aplicó en incrementos de 5 kPa en la dirección vertical, coincidente con el eje z de las probetas. Del mismo modo, en cada incremento de esfuerzo ejecutado, se esperó a que las deformaciones se establecieran con el transcurso del tiempo, para luego proseguir con el siguiente incremento de esfuerzo desviador. Los ensayos de corte triaxial se continuaron incrementando el esfuerzo desviador hasta lograr la máxima deformación posible de medir con el dispositivo, es decir, se consideraron terminados cuando alguno de los seis LVDT que emplea el dispositivo salió de rango, impidiendo así continuar con la medición de las deformaciones en forma adecuada. Durante la ejecución de estos ensayos, se midieron

los desplazamientos en cada una de las seis caras de la probeta, permitiendo calcular las deformaciones en cada dirección principal (axial coincidente con el eje z; laterales coincidentes con los ejes x e y) y volumétricas.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Ensayos de compresión isotrópica (CI)

En la Figura 5 se presenta la curva de compresibilidad obtenida en el ensayo CI. En la misma pueden apreciarse los dos tramos de carga y descarga respectivamente. En el tramo de carga, pueden identificarse dos puntos característicos. El punto PL se considera como el límite de proporcionalidad (Chun *et al.*, 2004). Hasta este punto el material muestra un comportamiento con un módulo volumétrico inicial tangencial lineal. Luego de este punto, el módulo comienza a decrecer a través de una zona de transición (zona de fluencia) hasta alcanzar el valor de módulo plástico a partir del punto Y. De igual manera, en el tramo de descarga pueden identificarse tres zonas de comportamiento similar a las explicadas para el tramo de carga, las cuales están limitadas por los puntos PL' e Y'. Aquí se ha utilizado el apóstrofe (') para diferenciar los límites del tramo de descarga con los del tramo de carga. Asimismo, puede observarse la determinación de la presión de fluencia isotrópica, σ_f . El valor de σ_f es de 64 kPa para el tipo de EPS utilizada en este trabajo.

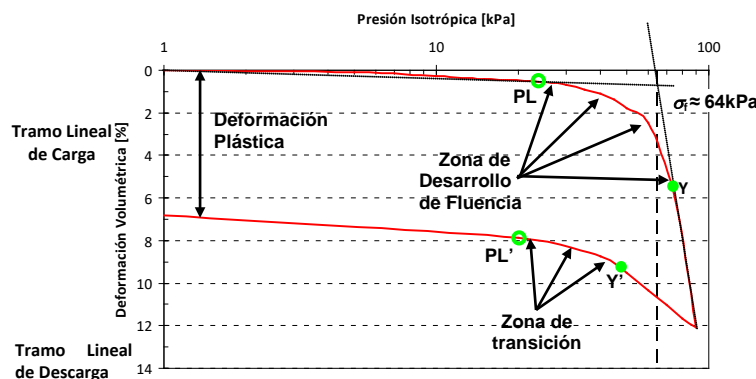


Figura 5. Curva de compresibilidad obtenida para la probeta de EPS en el dispositivo triaxial cúbico. PL: Límite Proporcional del tramo de recarga; PL': Límite Proporcional del tramo de descarga; Y: Límite de Fluencia del tramo de recarga; Y': Límite de fluencia del tramo de recarga.

5.2 Ensayos de compresión triaxial convencional (CTC)

En la Figura 6-a se presentan las curvas tensión desviadora vs. deformación axial vertical para las distintas presiones de confinamiento aplicadas. Como se puede observar, en cada curva correspondiente a cada nivel de confinamiento posee un módulo de deformación tangente inicial (E_{ti}) que representa el tramo lineal inicial. Después de la zona de fluencia, la pendiente de cada curva se reduce rápidamente hasta llegar asintóticamente al módulo plástico (E_p) que es el mismo para todas las curvas, independientemente del nivel de confinamiento aplicado que se trate. Asimismo, puede observarse que tanto la resistencia como la rigidez tangente inicial disminuyen con el incremento de la presión de confinamiento. En la Figura 6-b se presentan las curvas deformación volumétrica vs. deformación axial vertical para las distintas presiones de confinamiento aplicadas durante la etapa de la aplicación del esfuerzo desviador vertical. Puede observarse que el comportamiento volumétrico de este tipo de material es contractivo para todos los niveles de confinamiento aplicados. Para este tipo de materiales la contracción axial volumétrica debido a la carga desviadora aplicada no se compensó con la expansión volumétrica lateral. Esto se debe a que las deformaciones horizontales (calculadas a partir de las mediciones de los desplazamientos laterales en las cuatro caras de las probetas) resultaron ser de valores pequeños y negativos a bajas deformaciones, para luego reducirse rápidamente al valor de cero o adoptar valores de deformaciones positivas para grandes deformaciones verticales. Este comportamiento se observó para las probetas ensayadas a 15, 30 y 45 kPa, mientras que, para el caso de las probetas ensayadas a los confinamientos de 60, 75 y 90 kPa las deformaciones horizontales fueron siempre positivas (contracción). En las Figuras 7-a y 7-b se presentan las curvas de tensión desviadora vs. deformación principal medidas para las probetas ensayadas a 15 kPa y 75 kPa de confinamiento respectivamente, en las cuales se puede apreciar lo antes descrito.

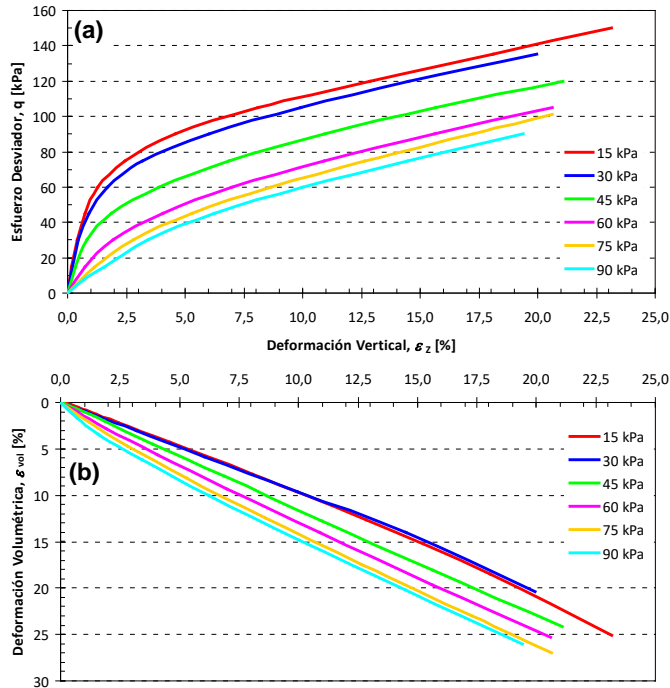


Figura 6. (a) Curvas de esfuerzo desviador vs. deformación axial vertical obtenidas en los ensayos de compresión triaxial convencional; (b) curvas de deformación volumétrica vs. deformación axial vertical obtenidas en los ensayos de compresión triaxial convencional.

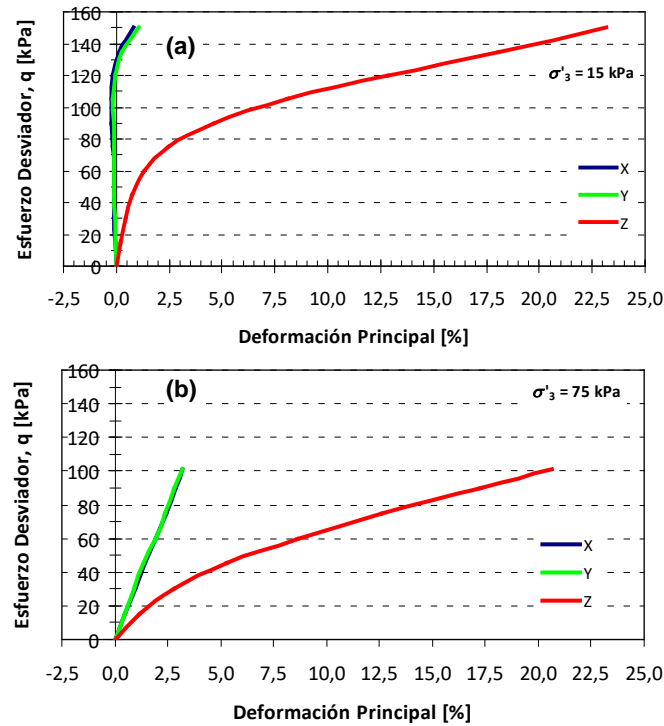


Figura 7. Curvas esfuerzo desviador vs. deformación axial principal obtenidas en los ensayos de compresión triaxial convencional (a) confinamiento de 15 kPa y (b) confinamiento de 75 kPa.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Módulos de rigidez tangente inicial (E_{ti}) y plástico (E_p)

En la Figura 8 se presenta la variación de los módulos tangente inicial (E_{ti}) y plástico (E_p) con el confinamiento. Para el caso del módulo E_{ti} , los valores se asimilan al de arcillas blandas y arenas muy sueltas. Asimismo, en la Figura 8 puede observarse una fuerte dependencia del módulo E_{ti} con el confinamiento mientras que el valor del módulo E_p permanece casi constante independientemente del nivel de confinamiento aplicado. Asimismo, puede observarse que la dependencia del módulo E_{ti} es decreciente con el confinamiento. Esta dependencia del módulo puede tomarse como un comportamiento bilineal con un punto de quiebre cercano al valor de la presión de fluencia isotrópica del material. Esto indica que, si el material alcanza la fluencia durante la etapa de compresión isotrópica, sus propiedades mecánicas cambian drásticamente. Este hecho se debe probablemente debido a un cambio irreversible en la microestructura del material, conformada por las celdas cerradas que ha comenzado a plastificarse.

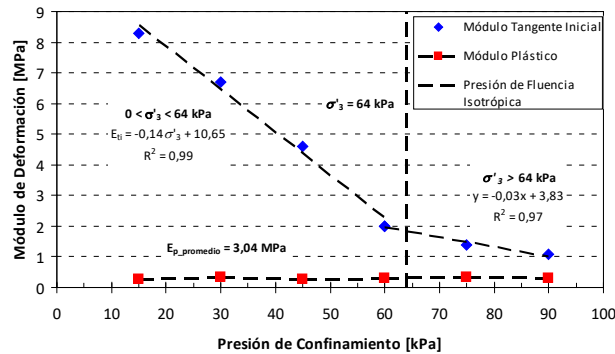


Figura 8. Variación del módulo tangente inicial (E_{ti}) y módulo plástico (E_p) con el confinamiento.

6.2 Presión de fluencia

Una de las principales causas que provocan la dificultad en modelar el comportamiento mecánico de algunos geomateriales radica en que los mismos pueden llegar a exhibir comportamiento elastoplástico desde el comienzo de la aplicación de la carga y pasan por el estado de fluencia sin un punto específico donde el comportamiento cambie de un tipo a otro de manera clara y definida. Para los casos donde los geomateriales presentan un comportamiento de tipo frágil (arenas densas, arcillas altamente preconsolidadas, suelos cementados, rocas, etc.), establecer el punto de fluencia no resulta dificultoso. Sin embargo, cuando los suelos presentan un comportamiento de tipo dúctil es imperioso establecer un criterio para poder seleccionar el punto de fluencia. Para determinar la tensión de fluencia, en este trabajo se aplicó el criterio adoptado por Hazarika (Hazarika, 2006) para el EPS. Este criterio propone se trazara la tangente inicial y del tramo plástico de cada curva tensión-deformación. A partir del punto de intersección de estas tangentes se desciende con una recta vertical hasta intersectar la curva tensión-deformación real. Este punto se define como Tensión de Fluencia Modificado (σ_y^M). En la Figura 9 se presenta la variación de la presión de fluencia modificada (σ_y^M) con el confinamiento, determinadas para los seis ensayos de compresión triaxial convencional ejecutados. En la misma, puede apreciarse que esta variación es bilineal y similar a la variación del módulo tangente inicial (E_{ti}), lo que afirma la alta dependencia del comportamiento mecánico de este material con el confinamiento.

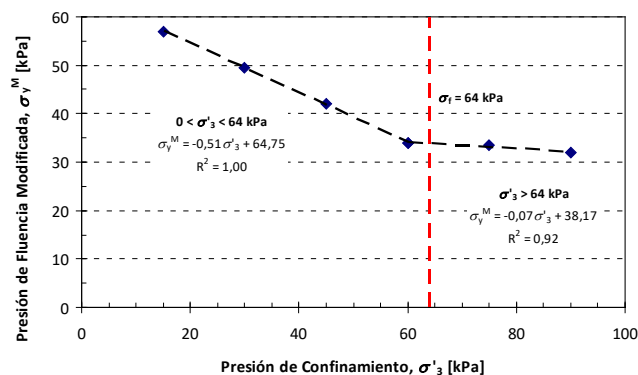


Figura 9. Variación de la presión de fluencia modificada (σ_y^M) con el confinamiento para las seis probetas ensayadas a compresión triaxial convencional.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una investigación experimental con objeto de caracterizar el comportamiento mecánico de una espuma de EPS en compresión triaxial. La influencia de la temperatura, humedad y tiempo de aplicación de cargas no han sido contempladas en el presente estudio.

Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

1. Se probó un dispositivo triaxial cúbico con control de aplicación de carga a través de membranas flexibles (contornos flexibles). Para ello se generó un programa de calibración experimental que se adapte a las características del comportamiento del EPS. Los resultados obtenidos en el programa experimental son consistentes con los resultados publicados por otros autores de otras partes del mundo utilizando dispositivos de bordes rígidos, aplicando control de deformaciones o tensiones a gran velocidad.
2. El comportamiento mecánico de los bloques de EPS ensayados es elastoplástico no lineal con endurecimiento continuo. Asimismo, su comportamiento es altamente dependiente de la presión de confinamiento.
3. El comportamiento bajo un estado de cargas a compresión isotrópica, el EPS resultó ser isótropo.
4. En compresión triaxial, el material experimenta una disminución tanto de la rigidez como de la resistencia, presentando características diferentes a confinamientos inferiores y superiores a la presión de fluencia determinada en compresión isotrópica. Asimismo, estas dependencias son bilineales respecto al confinamiento.
5. El módulo de deformación plástica de las curvas tensión-deformación de este material parece ser el mismo para todas las presiones de confinamiento aplicadas.
6. En compresión triaxial, el comportamiento volumétrico del material resulta siempre contractivo. La expansión lateral experimentada por las probetas resultó altamente dependiente del estado tensional. Para presiones de confinamiento inferiores a la presión de fluencia isotrópica, la expansión lateral resultó con valores de deformaciones negativas al inicio de las curvas tensión-deformación para luego disminuir hasta anularse y convertirse en positivas. Por el contrario, para presiones de confinamiento mayores a la presión de fluencia isotrópica, las deformaciones laterales resultaron siempre positivas durante todos los procesos de aplicación del esfuerzo desviador.

REFERENCIAS

- Akay, O. (2016). *Slope stabilization using EPS block geof foam with internal drainage system*, Geosynthetics International, 23, No. 1: 9-22.
- Arellano, D. y Stark, T. D. (2009). *Load bearing analysis of EPS-block geof foam embankments*, Bearing capacity of Roads, Railways and Airfields – Tutumluer & Al-Qadi (eds.), Taylor and Francis, 981-990.
- ASTM D (2007). Annual book of ASTM Standards. Vol. 04.08. ASTM International. West Conshohoken, P.A.
- Chun, B.-S.; Lim, H.-S. and Shin, Y.-W. (2001). *Application of constitutive model to predict the behavior of EPS-geof foam*, KSCE Journal of Civil Engineering, 5, No. 2: 175-183.
- Chun, B.-S., Lim, H.-S., Sagong, M. and Kim, K. (2004). *Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geof foam under triaxial compression tests*, Geotextiles and Geomembranes, 22: 223-237.
- Covassi, P. A. and Rinaldi, V. A. (2012). *Desarrollo de un dispositivo triaxial cúbico (DTC)*, Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, CAMSIG 2012, Rosario, Argentina.
- Covassi, P. A. y Rinaldi, V. A. (2015). *Inherent anisotropy of an undisturbed and compacted loess soil*, Sixth International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Buenos Aires, Argentina.
- Covassi, P. A. y Rinaldi, V. A. (2019). *Measuring mechanical anisotropy on geogrid reinforced soil using a cubical triaxial apparatus*, Seventh International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IS-Glasgow 2019, Scotland, UK.

- Elragi, A. F.; Negussey, D. and Kyanka, G. (2000). *Sample size effects on the behavior of EPS geofoam*, Proc. of the Soft Ground Technology Conference: Soft Ground Technology, ASCE, Geotechnical Special Publication No. 112, 280-291.
- Elragi, A. F. (2006). *Selected engineering properties and applications of EPS geofoam*, Softoria.
- Hatami, K. y Witthoeft, A. F. (2008). *A numerical study on the use of geofoam to increase the external stability of reinforced soil walls*, Geosynthetics International, 15, No. 6: 452-470.
- Hazarika, H. and Okuzono, S. (2004). *Modeling the behavior of a hybrid interactive system involving soil, structure and EPS geofoam*, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol. 44, No. 5: 149-162.
- Hazarika, H. (2006). *Stress-strain modeling of EPS geofoam for large-strain applications*, Geotextiles and Geomembranes, 24: 79-90.
- Horvath, J. S. (1994). *Expanded polystyrene (EPS) geofoam: an introduction to material behavior*, Geotextiles and Geomembranes, 14, 263-280.
- Horvath, J. S. (1997). *The compressible inclusion function of EPS geofoam*, Geotextiles and Geomembranes, 15, 77-120.
- Horvath, J. S. (2000). *Integral-Abutment Bridges: Problems and Innovative Solutions Using EPS Geofoam and Other Geosynthetics*, Manhattan College Research Report No. CE/GE-00-2, pp. 170.
- Horvath, J. S. (2010). *Lateral pressure reduction on earth-retaining structures using geofoams: correcting some misunderstandings*, ER2010: Earth Retention Conference 3, ASCE Geo-Institute, Bellevue, Washington, USA.
- Koerner, Robert M. (2005). *Designing with Geosynthetics*, 5th ed., Pearson, USA.
- Lin, L.-K.; Chen, L.-H. and Chen, R. H. L. (2010). *Evaluation of geofoam as geotechnical construction material*, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 22, No. 2: 160-170.
- Liyanapathirana, D. S. y Ekanayake, S. D. (2016). *Application of EPS geofoam in attenuating ground vibrations during vibratory pile driving*, Geotextiles and Geomembranes, 44: 59-69.
- Lutenegger, A. J. y Ciuffetti, M. (2009). *Full-scale pilot study to reduce lateral stresses in retaining structures using geofoam*, Final Report Proyect No. RSCH10-983 Vermont Department of Transportation, ppr. 142.
- Negussey, D. (1997). *Properties and applications of geofoam*, Society of the Plastic Industry, Inc. Washington D.C., USA.
- Ossa, A. y Romo, M. P. (2009). *Micro- and macro-mechanical study of compressive behavior of expanded polystyrene geofoam*, Geosynthetics International, 16, No. 5: 327- 338.
- Özer, A. T. (2016). *Laboratory study on the use of EPS-block geofoam for embankment widening*, Geosynthetics International, 23, No. 2: 71-85.
- Preber, T; Bang, S.; Chung, J. and Cho, Y. (1995). *Behavior of expanded polystyrene blocks*, Transportation Research Record 1462, 36-46.
- Sheeley, M. y Negussey, D. (2001). *An investigation of geofoam interface strength behavior*, Soft Ground Technology, 292-303.
- Witthoeft, A. F. and Kim, H. (2016). *Numerical investigation of earth pressure reduction on buried pipes using EPS geofoam compressible inclusions*, Geosynthetics International, 23, No. 4: 287-300.
- Yin, J.-H.; Cheng, C.-M., Kumruzzaman, Md. y Zou, W.-H. (2010). *New mixed boundary, true triaxial loading device for testing three-dimensional stress-strain-strength behaviour of geomaterials*, Canadian Geotechnical Journal, 47: 1-15.
- Zou, Y., Small, J.C. and Leo, C.J. (2000). *Behavior of EPS geofoam as flexible pavement subgrade material in model tests*, Geosynthetics International, Vol. 7, No. 1: 1-22.