

# Estudio de deformación en célula edométrica de preparados de arena y EPS para la mejora del terreno.

Alumno: LOUDMILLA FEZZANI

Directora: MARÍA ENCARNACIÓN MARTINEZ MORENO

Codirector: IVAN ALHAMA MANTECA





## Agradecimientos

Quisiera dar las gracias a mis padres, hermano y a mis amigas por apoyarme en todo momento en este camino y hacerlo mucho más bonito.

A Iván Alhama y a Encarni Martínez Moreno por prestarse a ayudarme en todo momento para hacer este TFG.

Y por último, al equipo de “road” por estar ahí.







# Índice

1	Introducción .....	1
1.1	Resumen.....	1
1.2	Objetivos y alcance .....	2
2	Fundamentos teóricos.....	2
2.1	Caracterización de los materiales.....	2
2.2	Características de los ensayos y procedimientos de laboratorio .....	8
2.2.1	Condiciones edométricas .....	8
2.2.2	Normativa utilizada .....	11
3	Metodología .....	19
4	Preparación de muestras.....	22
4.1	Ensayos Arena .....	22
4.1.1	Curva granulométrica .....	23
4.1.2	Gs.....	25
4.1.3	Arena densidad mínima, porosidad máxima .....	28
4.1.4	Arena densidad máxima, porosidad mínima. ....	30
4.2	Ensayos EPS. ....	34
4.2.1	Preparación de las muestras.....	34
4.2.2	Densidad del material. Procedimiento de obtención. ....	35
4.3	Muestras para ensayo edométrico.....	39
4.3.1	EPS al 0.2 % .....	39
4.3.2	EPS al 1 % .....	40
5	Ensayo edométrico .....	41
5.1	Preparación del ensayo y procedimiento .....	41
5.2	Ensayo muestra 0.2 .....	44
5.2.1	Ensayo 1 .....	44
5.2.2	Ensayo 2 .....	46
5.3	Ensayo muestra 1.0 .....	47
5.3.1	Ensayo 1 .....	47
5.3.2	Ensayo 2 .....	48
6	Discusión de resultados.....	50
6.1	Comentarios generales sobre el comportamiento del material y su caracterización. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

7	Conclusiones y comentarios finales .....	54
7.1	Comentarios respecto a las conclusiones y resultados del artículo.....	<b>¡Error!</b>
	<b>Marcador no definido.</b>	
8	Referencias .....	55



## 1 INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Resumen

El EPS (poliestireno expandido) es un material plástico y rígido fabricado a partir del moldeo de perlas de poliestireno expandible o uno de sus copolímeros, que presenta una estructura celular cerrada y rellena de aire. Dicho material ofrece unas propiedades aislantes y resistentes a la humedad, propiedades que se mantienen durante toda su vida útil sin apenas variaciones.

En la actualidad el EPS se utiliza principalmente para aislamiento o material de aligeramiento, aunque en 1960, en Noruega se descubrió que el EPS era adecuado para el sector de la ingeniería civil (Figura 1.1). Por una parte, su efecto aislante evitaba que se congelase el subsuelo, eliminando así los posteriores problemas del deshielo. Por otra parte, su resistencia mecánica y cohesión permitían la construcción de estructuras que tienen una gran resistencia vertical y horizontal.



Figura 1.1 Uso del EPS en ingeniería civil. Fuente: "ANAPE"

En zonas donde el terreno es muy blando, siempre es conveniente mejorarlo, y el principal material empleado para ello suele ser la arena. Dicho material presenta una serie de inconvenientes: se necesitan grandes cantidades, casi siempre se producen asentamientos (incrementa el plazo de ejecución), y también habría que tener en cuenta costes de mantenimiento para situaciones futuras.

Para solventar este problema se estudiará el empleo de arena y distintas proporciones de EPS y se analizará el comportamiento conjunto de estos dos materiales mediante un ensayo edométrico.

En el artículo *An investigation on the geotechnical properties of sand–EPS mixture using large oedometer apparatus* (Chenari, R. J. et al, 2016), se realizó una investigación sobre las propiedades geotécnicas de la mezcla de arena y EPS para su posterior aplicación en la ingeniería geotécnica. Se verán los puntos en común con este artículo.

En este proyecto se analizarán las propiedades de los dos materiales por separado, tanto de la arena como del EPS. También se realizarán mezclas de arena y EPS en distintas proporciones y se someterán a un ensayo edométrico para analizar su deformación.

## 1.2 Objetivos y alcance

El objetivo principal que se pretende conseguir en este proyecto es el estudio de deformación en célula edométrica de preparados de arena y EPS para la mejora del terreno.

Otro objetivo que se pretende alcanzar es comparar los ensayos que se hicieron en el trabajo *An investigation on the geotechnical properties of sand–EPS mixture using large oedometer apparatus* (Chenari, R. J. et al, 2016) y ver los puntos en común que se tienen con este.

Los objetivos secundarios que también se pretenden alcanzar y que son necesarios para conseguir el objetivo principal propuesto, son:

- Manejo del edómetro.
- Manejo del aparato METATEST, para registro de deformaciones de forma computarizada.
- Desarrollo de procedimientos para preparado de muestras con diferentes proporciones de EPS y arena
- Establecer los rangos de deformación y tiempos de deformación de cara a desarrollar estudios posteriores en ensayos de corte.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Caracterización de los materiales

#### 2.1.1 Arena

En geología se denomina arena al material compuesto por partículas cuyo tamaño varía entre 0.063 y 2mm. A la partícula individual dentro de este rango se le conoce como clasto o grano de arena.

Se recurrirá a la distinta bibliografía disponible para describir el comportamiento de dicho material.

El tamaño de partícula de arena utilizado en distintas normas (AASHTO, ASTM, Norma británica) queda descrito en el libro “*Mecánica de suelos–Propiedades físicas y químicas de los suelos más utilizados en ingeniería*” (Berry, P et David, R 1993), mediante la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Tamaño de partículas. Fuente: Mecánica de suelos. Berry. 1993

Descripción de las partículas	Tamaño de las partículas (mm)			
	Normas británicas <sup>†</sup>	AASHTO <sup>‡</sup>	ASTM <sup>§</sup>	Unificado <sup>¶</sup>
Grava	60–2	75–2	> 2	75–4.75
Arena	2–0.06	2–0.05	2–0.075	4.75–0.075
Limo	0.06–0.002	0.05–0.002	0.075–0.005	< 0.075 finos
Arcilla	< 0.002	< 0.002	< 0.005	

Por tanto, el tamaño de grano que debe tener el material debe estar comprendido entre 2 y 0.05mm.

En el libro “*Mecánica de suelos*” (Lambe, T. W. y Whitman, R. V, 2006) también establece un valor muy similar al que viene reflejado en la Tabla 2.2

Tabla 2.2 Tamaño de partículas. Fuente: Mecánica de suelos, Lambe. 2006

Bloques	> 30 cm
Boleos (bolos)	15 a 30 cm
Grava	2.0 mm (ó 4.76 mm) a 15 cm
Arena	0.06 (ó 0.076 mm) a 2.0 mm (ó 4.76 mm)
Limo	0.002 a 0.06 mm (ó 0.074 mm)
Arcilla	< 0.002 mm

Se puede observar que una arena debe tener un tamaño de partícula comprendido entre 0.06mm y 2mm.

Otro parámetro de la arena que se puede describir es el de  $G_s$ , densidad relativa de las partículas de un suelo. En el libro “*Mecánica de suelos–Propiedades físicas y químicas de los suelos más utilizados en ingeniería*” (Berry, P et David, R 1993), define que una arena debe tener un valor de  $G_s$  próximo a 2.65, tal y como aparece en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Valores de densidad específica. Fuente: Mecánica de suelos, Berry. 1993

Tipo de suelo	$G_s$
Grava, arena y limo	2.65
Arcilla inorgánica	2.70
Arcilla orgánica	2.60
Turba amorfa	2.00
Turba fibrosa	1.50

Por último, se puede definir los valores de densidad mínima y máxima como aparece en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Propiedades de los suelos granulares. Fuente: Mecánica de suelos, Berry 1993

Descripción	Porosidad $n$ (%)	Relación de vacíos $e$	Contenido de humedad	
			$S_r = 1$ $w$ (%)	Densidad ( $Mg/m^3$ ) $\rho_d$ $\rho_s$
Arena uniforme suelta	46	0.85	32	1.44    1.89
Arena uniforme densa	34	0.51	19	1.75    2.08
Arena bien gradada suelta	40	0.67	25	1.59    1.98
Arena bien gradada densa	30	0.43	16	1.86    2.16
Tilita glacial bien gradada	20	0.25	9	2.11    2.32
Arcilla glacial blanda	55	1.20	45	1.21    1.76
Arcilla glacial dura	37	0.60	22	1.69    2.06
Arcilla ligeramente orgánica blanda	66	1.90	70	0.92    1.57
Arcilla muy orgánica blanda	75	3.00	110	0.68    1.43
Arcilla montmorilonítica blanda (bentonita)	84	5.20	194	0.44    1.28
Turba amorfa	91	10	500	0.18    1.09
Turba fibrosa	94	15	1,000	0.09    1.03

Establece unos valores para la densidad máxima  $1.75 \text{ mg/m}^3$  y para la densidad mínima un valor que es próximo a  $1.44 \text{ mg/m}^3$ .

### 2.1.2 EPS (Poliestireno expandido)

#### Características y propiedades:

EPS (poliestireno expandido), es un plástico, casi siempre de color blanco, que se utiliza para diversos fines desde los años 60 (Figura 2.1).

En España el principal uso que se le suele dar a este material es como material aislante, para embalaje y también en la construcción.



Figura 2.1 Muestra de EPS

Es uno de los materiales aislantes más baratos y debido a su especial estructura, uno de los mejor adaptados a los diferentes sistemas de construcción. De las diversas ventajas que tiene podemos destacar las siguientes:

- Es ligero y sencillo de procesar
- En el sector de la ingeniería civil no se ve afectado por la humedad ni por el agua. Tampoco se produce difusión en el material.
- Soporta cargas mecánicas gracias a su estructura de celdas
- Es muy duradero y no se deteriora con el transcurso del tiempo

En cuanto a la producción de este material, podemos dividir el proceso en dos fases: una primera fase que consiste en convertir el petróleo en poliestireno expandible, y otra que consiste en convertir el poliestireno expandible en productos de EPS.

Las diversas propiedades del EPS están relacionadas con la designación del peso por unidad de volumen del EPS. Los productos y artículos acabados en poliestireno expandido (EPS) se caracterizan por ser extraordinariamente ligeros y resistentes. En función de la aplicación las densidades se sitúan en el intervalo que va desde los 10kg/m<sup>3</sup> hasta los 50kg/m<sup>3</sup>.

Nombraremos las siguientes propiedades mecánicas obtenidas de “Asociación nacional del poliestireno expandido, ANAPE”:

- Resistencia a la compresión:

El diagrama de tensión- deformación del EPS tiene una forma peculiar. El límite elástico se sitúa para un valor de la deformación comprendido entre el 1 y 1,5%.

La resistencia a la compresión se determina como la presión a la cual se produce una deformación del 10% de la muestra sometida a ensayo. Esta deformación elástica lineal inicial se emplea para determinar el módulo de elasticidad tangencial ( $E_t$  en kPa). Dicha evolución se representa en la Figura 2.2.

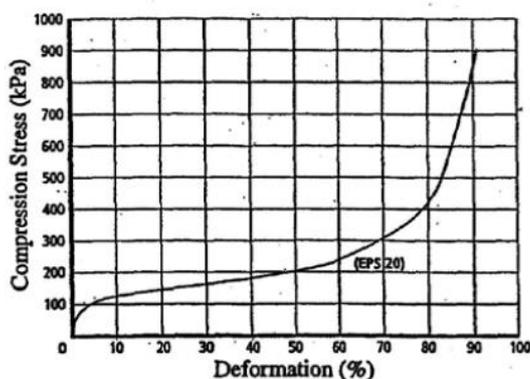


Figure 1: Diagram Showing Load-Deformation

Figura 2.2. Evolución de la tensión-deformación del EPS. Figura extraída de “ANAPE”

En la segunda parte de la evolución existe una tendencia elástica no lineal. La Figura 2.3 muestra la evolución más allá de la primera sección:

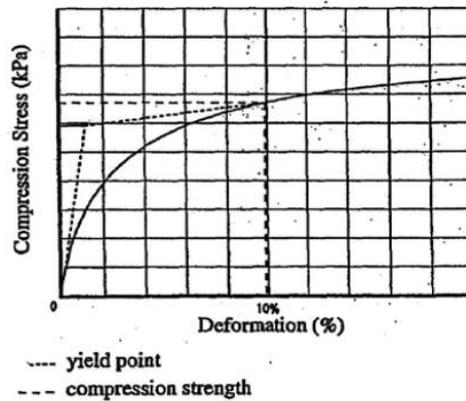


Figure 2: (Initial) EPS Stress-Strain Relationship

Figura 2.3 Limite elástico del EPS. Figura extraída de “ANAPE”

Este límite elástico representa aproximadamente el 75% de la tensión de compresión para todas las densidades de EPS.

- Contracción transversal

El módulo de Poisson o de contracción transversal es pequeño, considerándose despreciable en algunos países. Para quedarnos del lado de la seguridad es conveniente designarle un valor de  $\nu = 0,1$ . Este valor se aplica en la zona de deformación elástica.

- Fluencia y relajación

La fluencia consiste en el aumento de la deformación a lo largo del tiempo como consecuencia de la carga que tiene que soportar. En el EPS la fluencia depende de las siguientes variables: densidad, presión, deformación, tiempo y temperatura.

La relajación se produce cuando la presión interna disminuye a lo largo del tiempo. Se recomienda realizar el cálculo de acuerdo con las normas CEN para el EPS.

- Resistencia a la compresión a largo plazo

La resistencia a la compresión a largo plazo es el nivel admisible de carga continua durante 50 años con el objetivo de eliminar los efectos de fluencia indeseables. Los valores que se muestran en la Tabla 2.5 varían en función del tipo de EPS.

Tabla 2.5 Resistencia a la compresión a largo plazo. Figura extraída de “ANAPE”

	Tipos de EPS					
Resistencia a la compresión a largo plazo	15	20	25	30	35	40
$\sigma$ largo plazo	20	30	40	50	60	70

- Coeficiente de rozamiento:

Se vincula dicho coeficiente a la oposición al deslizamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto según la intensidad del apoyo mutuo que experimenta. En los cálculos, se puede utilizar 0,5 como un valor seguro.

Otras características que habría que tener en cuenta son:

- Temperaturas

Como se ha citado antes, el rango de temperaturas en el que este material puede utilizarse con total seguridad sin que sus propiedades se vean afectadas no tiene limitación alguna por el extremo inferior (excepto las variaciones dimensionales por contracción). Con respecto al extremo superior el límite de temperaturas de uso se sitúa alrededor de los 100°C para acciones de corta duración, y 80°C para acciones prolongadas.

- Propiedades químicas

El poliestireno expandido es estable frente a muchos productos químicos. Si se utilizan adhesivos, pinturas disolventes y vapores concentrados de estos productos, hay que esperar un ataque de estas sustancias. El EPS no suele tener un comportamiento estable frente a los ácidos, hidrocarburos asfálticos ni aceite de Diesel ni carburante.

**Campo de aplicación:**

El EPS tiene diversas aplicaciones en el sector de la ingeniería civil. Se citarán diversas soluciones teóricas:

- Estructuras con bajo nivel de asentamiento:

Aunque el EPS sea ligero, es capaz de soportar una carga de compresión conservando su forma. El empleo de este material en distintos proyectos de ingeniería civil conduce por tanto a estructuras con bajo nivel de asentamiento. Esto favorece que el coste futuro de mantenimiento sea inferior y también que la estructura se pueda poner en uso inmediatamente.

Los materiales de relleno tradicionales, como la arena pueden provocar la pérdida de estabilidad del suelo. Una estructura con EPS no tiene mucho más peso que el terreno excavado y por tanto no afecta a la estabilidad del suelo.

– Prevención de cargas laterales:

Las cimentaciones con EPS no tienen el problema de la resistencia a tracción mínima, por tanto, no conducirá a un diseño de carreteras en el que el ángulo del talud natural es un factor determinante. Estos pueden incluso terminar en un borde vertical.

– Ausencia de daños por heladas:

Se puede emplear incluso capas delgadas de EPS, ya que estas tienen un excelente aislamiento térmico.

En cuanto al subsuelo sensible a las heladas, una alimentación continua de calor geotérmico mantiene la temperatura de la cimentación por encima del punto de congelación, debido a que el EPS impide la pérdida de calor.

– Calidad especial para drenaje:

Es habitual emplear EPS para drenar el exceso de agua de un terreno, utilizándose principalmente en el drenaje de agua en parques o en campos de deportes.

El proceso de drenaje se realiza mediante una red de pasos entre los granos de EPS, utilizándose para ello un EPS especial llamado EPS sintetizado.

## 2.2 Características de los ensayos y procedimientos de laboratorio

### 2.2.1 Condiciones edométricas.

Según la información obtenida del libro “*Ingeniería geológica*” (González de Vallejo et al, 2002), este modelo se emplea para estimar los asentamientos producidos por terraplenes, zapatas, losas etc., especialmente en suelos finos y saturados.

El ensayo se lleva a cabo con un aparato denominado edómetro, que consiste en un anillo rígido de acero en cuyo interior se coloca la probeta de suelo. En la parte inferior y superior de la probeta se colocan unas piedras porosas que permiten el drenaje del agua contenida en el suelo.

Sobre la piedra porosa superior se coloca una placa rígida y en su centro se aplica la carga vertical. Dicha carga se va aumentando en escalones, normalmente cada escalón duplica la carga anterior, y se mide lo que se comprime o asienta la probeta de suelo con los distintos métodos disponibles para la recogida de datos.

La función del anillo, Figura 2.4, que contiene la muestra es impedir las deformaciones laterales e imponer condiciones de presión unidimensional. Esto hace que, en un suelo

poco permeable, cuando se coloca un nuevo escalón de carga, todo el incremento de tensión vertical total se transmite instantáneamente al agua intersticial y que las tensiones efectivas no varíen.

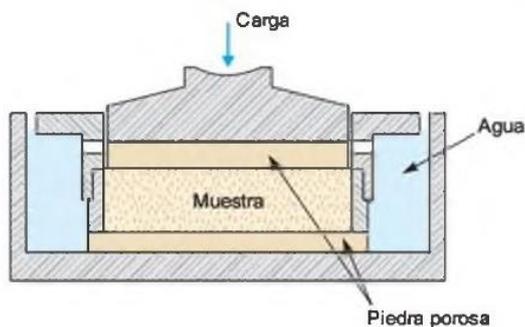


Figura 2.4 Edómetro, Vallejo. 2002. Mecánica de suelos.

A efectos prácticos es como si se tratara de un estrato de suelo situado entre dos capas de suelo permeables y se aplicara al conjunto una carga. El edómetro puede servir para reproducir en el laboratorio los aspectos descritos anteriormente.

Este aparato presenta la ventaja de que es un dispositivo tradicional, sencillo de operar y ofrece unos resultados confiables.

Sin embargo, presenta como desventaja el hecho de que para su uso se necesita una técnica cuidadosa y una supervisión permanente hasta la finalización del ensayo, el cual puede durar varios días.

Con los resultados que proporciona este ensayo se puede hacer una representación de la deformación en función del tiempo. La curva que se obtiene para cada escalón de carga se denomina curva de consolidación.

Una vez que se han determinado los escalones de carga, se procede a descargar según otros escalones, obteniéndose así una rama de descarga, que representa la capacidad que tiene el terreno de recuperarse.

Los resultados, tanto de la rama de carga, como la de descarga, se representan en un gráfico. En las ordenadas se indican las deformaciones verticales unitarias o los índices de poros, y en las abscisas las tensiones efectivas verticales de cada escalón. Dado que lo que realmente se mide es la compresión vertical  $\Delta H$  de una pastilla de suelo de espesor inicial  $H_0$  para determinar el índice de poros tras cada escalón se hace uso de la siguiente relación obtenida del libro “Mecánica de suelos” (González Vallejo, et al.,2002):

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \rightarrow e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_0} (1 + e_0)$$

Siendo  $e_0$  el índice de poros inicial de la muestra.

En la Figura 2.5 se muestra una curva edométrica de un ensayo en el que se ha efectuado un ciclo de descarga-recarga, según Lancellota (1991)

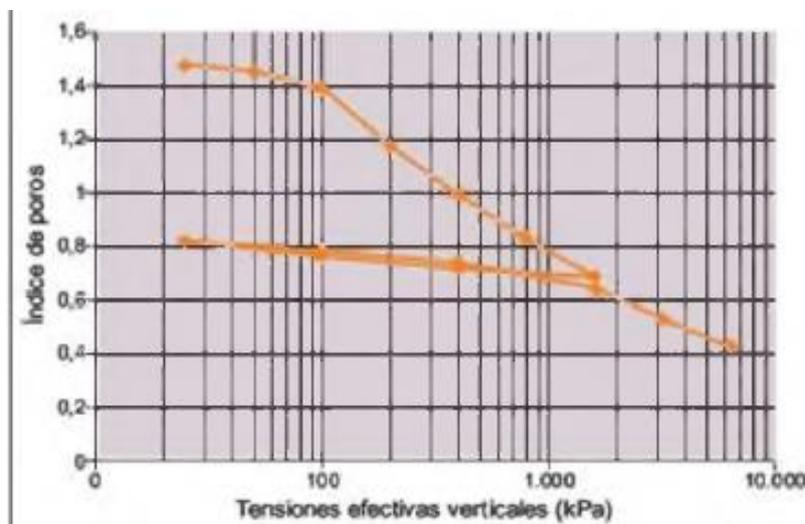


Figura 2.5 Curva edométrica. Lancellota. 1991.

A partir de la curva edométrica de la Figura 2.5, se pueden obtener algunos parámetros que describiremos a continuación:

- Índice de compresión y entumecimiento:

Una vez obtenida la curva se pueden obtener los índices de compresión y entumecimiento.

Las curvas edométricas tienen un tramo recto en la rama de carga, la pendiente de este tramo recto es una constante del suelo que se denomina índice de compresión. Si se eligen dos puntos en el tramo recto inicial y final se puede obtener la pendiente. Este índice indica si el suelo es más o menos deformable.

En cuanto al índice de entumecimiento, se trata de la pendiente del tramo recto de la curva de descarga.

- Módulo edométrico:

Es un módulo de compresión confinada sin deformaciones horizontales que solo tiene validez para determinados valores de carga, viene expresado por:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\varepsilon_v}$$

Donde  $\Delta\sigma'_v$  es el incremento de la presión efectiva vertical en un intervalo de la curva edométrica y  $\Delta\varepsilon_v$  es la deformación vertical unitaria que le corresponde.

- Módulo de compresibilidad volumétrica:

Es el inverso del módulo edométrico

$$m_v = \Delta \varepsilon_v / \Delta \sigma'_v$$

En cuanto al tiempo de consolidación, suele considerarse que la muestra ha alcanzado la consolidación transcurridas las 24 horas

### 2.2.2 Normativa utilizada

Para la realización de los diferentes ensayos previos al ensayo edométrico se utilizarán las siguientes normativas para obtener los valores que se necesitan:

#### - Curva granulométrica

Para realizar la curva granulométrica a la muestra se utilizará la Norma UNE 103 101, que tiene como objetivo especificar el método para determinar los diferentes tamaños de las partículas que componen un suelo. Otro objetivo de esta norma es obtener la cantidad, expresada en tanto por cien de estas, que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo.

El material necesario para realizar el ensayo es el siguiente:

- Unos tamices de malla cuadrada y tejido de alambre que cumplan la Norma UNE 7 050-2. Una serie que se suele utilizar es la siguiente: 100; 80; 63; 50; 40; 25; 20; 12.5; 10; 6.3; 5; 2; 1.25; 0.40; 0.160; 0.080.
- Una balanza para realizar las mediciones de los pesos.
- Un equipo formado por un agitador mecánico, con un motor eléctrico que pueda agitar a una velocidad superior a 10000 r.p.m.
- Secadores con una temperatura regulable hasta 60°C
- Una estufa de desecación regulable hasta los 115°C
- Un vaso de precipitados
- Un cepillo y una brocha para limpiar las mallas de los tamices.

El procedimiento operatorio de este ensayo es el siguiente:

Se selecciona una muestra de suelo y se mide su masa, tanto la de esta como la del recipiente que la contiene. A continuación, se seleccionan los tamices que se crean convenientes para la realización del ensayo y se ordenan de mayor a menor abertura. Vertemos la muestra y procedemos a su agitación a potencia 7 y durante 15 minutos.

Pasado este tiempo se extraen los tamices del agitador y se mide la masa de suelo que queda retenida en cada tamiz. Con la ayuda de la brocha y del cepillo se intenta extraer todos los granos que puedan quedar retenidos en los tamices.

Se expresan los datos obtenidos en una tabla como la Tabla 2.6

Tabla 2.6 Tabla para la realización de la curva granulométrica.

ABERTURA TAMIZ (MM)	PESO PARCIAL (G)	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	%PASANTE ACUMULADO
FONDO	(Gramos)			
TOTAL	(Gramos)			

Y por último se representan los resultados en un gráfico semilogarítmico. En las abscisas el tamaño de la abertura del tamiz y en las ordenadas el porcentaje pasante acumulado.

- Densidad relativa de las partículas de un suelo Gs

Para determinar la densidad relativa de las partículas menores de 5mm de un suelo se emplea la Norma UNE 103-302-94. Esta densidad viene definida como el cociente entre la masa de un determinado volumen de suelo, exento de poros y la masa del mismo volumen de agua destilada exenta de aire.

Para la realización del ensayo se necesitan tres picnómetros como el que aparece en la Figura 2.6 de capacidad entre 50 cm<sup>3</sup> y 100cm<sup>3</sup>. Una balanza para realizar las mediciones de las masas, agua destilada y un paño.



Figura 2.6 Picnómetro para la realización del ensayo Gs.

El procedimiento que hay que seguir para realizar el ensayo es el siguiente: primero se mide la masa del picnómetro seco, a continuación, se divide la muestra en tres porciones de unos 15g aproximadamente.

Se fija una temperatura constante en el picnómetro, entre 20°C y 25°C, lo más próxima a la del ambiente, para que a la hora de introducir el agua éste no sufra variaciones.

Se llena el picnómetro hasta la línea de enrase y se mide su masa  $M_1$ . Se extrae el cuello del picnómetro y se vacía el agua hasta que quede la mitad y se mide su masa  $M_2$  (sin colocar el cuello). El siguiente paso será verter la porción de muestra de suelo en el picnómetro y determinar su masa  $M_3$  (sin colocar el cuello). Por último, se coloca el cuello del picnómetro y se realiza la última medición del conjunto, al que se llamará  $M_4$ .

Con la expresión que facilita la Norma se obtiene la densidad relativa de las partículas sólidas:

$$G_s = \frac{M_3 - M_2}{(M_3 - M_2) + (M_1 - M_4)}$$

Se obtienen 3 valores de  $G_s$ , una para cada porción de suelo. El valor que se adopta será la media de los tres.

#### - Densidad mínima de una arena

Para determinar la densidad mínima de una arena se utilizará la Norma UNE 103-105-93, que especifica el método para la determinación de la densidad de una arena seca, no cementada, que pase en su totalidad por el tamiz 5.0 mm y que no contenga más de un 10% del material que pase por el tamiz 0.08mm.

El material que se va a necesitar va a ser el siguiente: cuatro recipientes cuyas dimensiones se puedan medir (diámetro y altura), un embudo, un micrómetro o calibre, una balanza y un ensarador metálico.



Figura 2.7 Recipiente metálico empleado en los ensayos.

El recipiente que se va a emplear va a ser el que aparece en la Figura 2.7, se mide la masa del recipiente  $M_1$ , también su altura y diámetro con un pie de rey. Finalmente se obtiene su volumen con la siguiente expresión:

$$V = \frac{\pi * R^2}{4} * H$$

Donde

R es el radio medido en dm,

H es la altura del recipiente medida en dm.

A continuación, se seleccionan 2 kg de muestra de suelo y se divide en cuatro partes iguales (250g aproximadamente).

Se vierte la muestra en el molde con ayuda del embudo, de la siguiente manera: se coloca el dedo en la parte inferior del embudo y se vierte la muestra de suelo. Se quita el dedo y se vierte la muestra dentro del recipiente con la menor altura posible hasta formar un cono cuyo vértice coincida con el extremo superior del recipiente. Se enrasa la arena con la boca del molde evitando la compactación de la arena.

Al terminar este proceso se mide la masa de la muestra que acabamos de verter y se llamará  $M_2$ . Con la siguiente expresión se determina la densidad mínima:

$$\rho_{\min} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

se obtienen cuatro valores de densidad mínima, y se adoptará el valor de la media aritmética de estos, expresado en  $\text{kg/dm}^3$

#### - Densidad máxima de una arena

Para determinar la densidad máxima de una arena se utilizarán dos métodos, el primero será el que indica la Norma UNE 103-106-93 que proporciona un método para determinar dicha densidad mediante el método del apisonado. Se define esta densidad como aquella que alcanza la arena cuando se compacta en estado seco con una energía por unidad de volumen. Y otro método por vibración.

En cuanto al material a utilizar: un molde cilíndrico como el que se ha usado en la determinación de la densidad mínima (Figura 2.7), una maza para poder realizar la compactación, agua destilada para humedecer la muestra de suelo, una estufa de desecación cuya temperatura sea regulable hasta los  $115^\circ\text{C}$  y un enrasador metálico.

La norma indica la utilización de una maza con un pistón de 4.54kg y una altura controlada de 457mm, accionada a mano o mediante un compactador mecánico. Como no se dispone de este material, se humedece la muestra y se compactará con una maza.

Otro método que se empleará será la compactación de la muestra mediante vibración.

Para ambos métodos se determinará la masa del molde  $M_1$  y sus dimensiones. Se vierte la muestra, se compacta con los dos métodos mencionados y se mide su masa  $M_2$ . Con la siguiente expresión se determina la densidad máxima de una arena.

$$\rho_{\max} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

Se tomará como densidad máxima de la muestra la media de las cuatro densidades, expresado en  $\text{kg}/\text{dm}^3$

#### - Procedimiento para la obtención de la densidad del EPS

No existe ninguna normativa para obtener la densidad del EPS. Pero como es necesario hallarla se decide utilizar el siguiente método que se detalla a continuación.

El material que se emplea para este ensayo es el siguiente: una muestra de EPS desgranado y con un tamaño homogéneo, un recipiente cuyas dimensiones se puedan determinar, agua destilada y una balanza para realizar las mediciones.

En primer lugar, se debe determinar el volumen del recipiente, si tiene una forma adecuada y sus dimensiones se pueden determinar utilizaremos la expresión del volumen mencionada anteriormente, si no se pueden determinar, como es el caso, se mide la masa del recipiente vacío y se realiza otra medición del recipiente lleno de agua. Como la densidad del agua es aproximadamente  $1\text{kg}/\text{m}^3$ , se podrá obtener el volumen del recipiente haciendo diferencia de masas.

Con el recipiente totalmente seco se procede a llenarlo de EPS, obteniendo así la masa de EPS que cabe en ese volumen,  $M_2$

Se coloca una tapa encima del recipiente para evitar que el EPS se salga y se procede a llenarlo de agua, de manera que todos los huecos ocupados por aire se llenen de agua. Se pesa, obteniendo así la masa de EPS y la de agua.  $M_3$

Se hace la diferencia de la masa de EPS y agua ( $M_3$ ) y la masa de EPS que cabe en el volumen del recipiente ( $M_2$ ) se obtiene el volumen del EPS.

Sabiendo la masa del EPS y volumen del EPS se podrá hallar la densidad del EPS.

- Norma edómetro.

Para la realización de ensayo edométrico se utilizará la Norma UNE 103-405-94. Este ensayo se utiliza para determinar las características de consolidación del suelo, para el cual se utiliza una probeta cilíndrica confinada lateralmente. Esta probeta se somete a distintas presiones verticales, permitiendo el drenaje por sus caras superior e inferior, y se miden los asientos que se producen.

Para la realización del ensayo se necesitará un equipo edométrico formado por los siguientes elementos esenciales:

- **Célula edométrica**, en la que la probeta pueda estar cubierta de agua y sometida a presiones correspondientes.  
Dicha célula edométrica debe estar compuesta por los siguientes elementos básicos:
  1. Una base metálica, resistente a la corrosión y de un material que no produzca reacciones con el anillo porta probeta.
  2. Una pieza del mismo material que la base metálica que fije el anillo porta probeta sobre la placa porosa inferior.
  3. Un cuerpo lateral de cierre.
  4. Un anillo en donde se aloje la probeta de suelo a ensayar, llamado anillo porta probeta. Las dimensiones de la superficie cilíndrica tienen que estar dentro de estos valones: Diámetro (D) – mínimo 45 mm, Altura (Ho)- mínimo 12mm, relación entre diámetro altura (D/Ho)- no inferior a 2.5 en suelos arcillosos o limosos.
  5. Placas porosas, que permitan su drenaje y que puedan transmitir cargas.
  6. Pistón de carga. Su disposición sobre la placa porosa superior debe ser tal que permita el libre drenaje del agua. Debe ser rígido y que no sufra deformaciones apreciables durante el proceso de carga.
- **Aparato capaz de medir las deformaciones verticales de la probeta.** Puede ser mecánico o transductor y con una precisión mínima de 0.001 mm. Su recorrido debe ser inferior a 10 mm
- **Bancada**, que permita la aplicación de las diferentes cargas a la probeta y que pueda mantenerlas constantes durante cualquier periodo de tiempo. También tiene que estar centrada con respecto al yugo y tener un sistema palanca con pesas calibradas.

Preparación de la probeta:

Se puede preparar por distintos procedimientos, dependiendo del tipo de muestra que se obtenga. La norma UNE 103-405-94 contempla los siguientes casos:

- Por extrusión de una muestra inalterada contenida en un tubo portamuestras

- Por tallado, partiendo de una muestra en bloque.
- Por moldeo. Se prepara la muestra realizando la compactación con las condiciones deseadas y en un molde adecuado.

Procedimiento operatorio:

Se coloca la placa porosa inferior sobre la base de la célula, a continuación, el anillo con la probeta, la placa porosa superior y el pistón de carga, de manera que todos estos elementos queden centrados sobre la superficie de la probeta. Se coloca el cuerpo lateral de cierre.

Se coloca la célula edométrica sobre la bancada, ajustando el contrapeso, de manera que entren en contacto todos los elementos de transmisión de carga y que el extremo de la palanca en el que se colocan las pesas quede ligeramente por encima de su posición horizontal.

Se coloca el medidor de deformaciones en su posición, de manera que el vástago tenga suficiente recorrido. Anotamos su lectura inicial, que corresponde al cero de deformaciones.

Una vez que hayamos realizado los anteriores pasos de puesta en marcha, realizamos dos siguientes procesos:

-Proceso de carga:

Iniciamos el proceso aplicando las diferentes presiones en la siguiente secuencia de escalones: 0.05; 0.1; 0.2; 0.4; 0.8; 1.5; 3.0; 6.0; 10.0; 15.0 kp/cm<sup>2</sup>

Se suele aplicar seis escalones consecutivos, de manera que cada presión sea aproximadamente el doble de la anterior y manteniendo cada escalón durante 24h.

El proceso para determinar la consolidación es el siguiente:

Se toma como lectura inicial del primer escalón, la correspondiente al cero de deformaciones.

Al mismo tiempo que se retira la carga correspondiente a la presión de ajuste, se añade en la bancada pesas que corresponden al primer escalón seleccionado, colocándolas cuidadosamente para que no se produzca impacto.

Una vez que se alcance la situación de equilibrio, se calcula la presión ejercida sobre la probeta, dividiendo la carga aplicada por la sección de la probeta. Este valor es el que se conoce como valor de hinchamiento.

Se continua el ensayo aplicando el escalón inmediatamente superior a la presión de hinchamiento y se anota la lectura que registra el medidor al cabo de 24h, denominándose esta última como lectura del escalón.

Se representan las lecturas del medidor en una gráfica en función del tiempo.

- Proceso de descarga:

Cuando se finaliza el proceso de carga se inicia el de descarga. Se va disminuyendo la última presión aplicada en el último escalón, retirando las pesas del colgadero. Igual que antes se mantiene el escalón 24h.

Al finalizar este proceso, se determina inmediatamente la masa del conjunto, tanto del anillo como de la probeta, con una precisión de 0.01g.

Expresión de los resultados obtenidos:

Se determinan las humedades inicial y final de la probeta, según el procedimiento de la norma UNE 103-300. Y se calcula la densidad seca inicial:

$$p_d = \frac{m_d}{A H_0} \text{ en } g/cm^3$$

Donde

$m_d$  es la masa seca de la probeta en gramos;

A es la sección del anillo porta probeta en  $cm^2$

$H_0$  es la altura del anillo porta probeta en cm.

Se calcula también el grado de saturación inicial con:

$$S_r = \frac{w_0 G}{e_0} \text{ en } \%$$

donde

$w_0$  es la humedad inicial de la probeta en %;

G es la densidad relativa de las partículas

$e_0$  es el índice de poros inicial, que se determina mediante la siguiente expresión:

$$e_0 = \frac{G}{p_d} - 1$$

Las características de compresibilidad se representan mediante una gráfica que relaciona los índices de poros en ordenadas, en escala lineal con las presiones, aplicadas en abscisas, en escala logarítmica. Esta gráfica se denomina curva edométrica.

Para obtener los índices de poros que corresponden a cada escalón, se realiza lo siguiente:

Se determina la altura del sólido  $H_s$ :

$$H_s = \frac{H_0}{1 + e_0}$$

Se calcula la altura de la probeta final de cada escalón mediante:

$$H = H_0 - (\Delta H - c)$$

Donde

$\Delta H$  es la reducción de altura de la probeta, la deformación medida desde el inicio del ensayo hasta el final del escalón que se considere, expresada en cm

C es el valor de la corrección, determinada en calibración, expresada en m

Se calcula el índice de poros correspondiente al final de cada escalón como:

$$e = \frac{H - H_s}{H_s}$$

### 3 METODOLOGÍA

La metodología de trabajo empleada se detalla a continuación:

#### 3.1 Material para los ensayos

##### 3.1.1 Arena

Se selecciona una muestra de arena (Figura 3.1) disponible en el laboratorio de Geotecnia de Universidad Politécnica de Cartagena para realizar los ensayos mencionados anteriormente, que serán de gran utilidad para determinar las distintas propiedades de uno de los materiales que se va a emplear en el ensayo edométrico.



Figura 3.1 Muestra inicial de arena

### 3.1.2 EPS

En el laboratorio de geotecnia existen dos muestras de EPS, una con una densidad de 20 kg/m<sup>3</sup> y otra con una densidad de 40 kg/m<sup>3</sup>

Para realizar los ensayos del EPS, determinación de la densidad y para elaborar la mezcla de arena y EPS en diferentes proporciones se utiliza la muestra que tiene una densidad de 20kg/m<sup>3</sup> como se muestra en la Figura 3.2 ya que será más fácil de desgranar.



Figura 3.2 Muestra inicial de EPS

### 3.1.3 Metatest

Para el registro y la recopilación de las deformaciones que se van a producir durante la realización del ensayo edométrico se empleará el elemento que aparece en la Figura 3.3 que consta de un microprocesador Cyber- plus Evolution, disponible en el laboratorio de Geotecnia de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)



Figura 3.3Maquina para registro de datos Metatest



Figura 3.4. Transductor para registro de datos

Dicho aparato consta de 8 canales en los cuales se pueden conectar transductores como los que aparecen en la Figura 3.4 acoplados en el edómetro, ofreciendo así la posibilidad de registrar todas las deformaciones que se producen en la muestra.

Dispone de una entrada USB y una pantalla táctil que nos permite visualizar y registrar los datos.

### 3.1.4 Edómetro

Para este ensayo se utilizará el edómetro disponible en el laboratorio de Geotecnia de la UPCT, como los que aparecen en la Figura 3.5. Someteremos a esta prueba a la mezcla de arena y EPS en diferentes proporciones que se describen en los siguientes puntos. El edómetro consta de las siguientes partes:



Figura 3.5. Bancada Edómetro del laboratorio de Geotecnia

1. Cargadero, sitio en el que se colocaran las diferentes pesas
2. Contrapeso
3. Yugo
4. Palanca
5. Bancada

Consta también de una célula edométrica como la que aparece en la Figura 3.6 en la que se va a introducir la muestra para realizar el ensayo.



Figura 3.6 Célula edométrica

Dicha célula edométrica (1) está formada por dos placas porosas, una inferior y otra superior. Un pistón de carga (2) y el anillo edométrico (3).

#### 4 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

##### 4.1 Ensayos Arena

Para la realización de los ensayos de arena se seleccionó una porción de muestra como la que aparece en la Figura 3.1. Como esta muestra estaba contaminada de pequeñas partículas de EPS por estar al descubierto en el laboratorio se procedió a limpiarla y extraer las partículas de EPS. Como las partículas de EPS que contenía la arena pesaban poco, se procedió a abanicar la muestra, vertiéndola previamente en una bandeja amplia, para que así las partículas de EPS se separasen de la arena, tal y como aparece en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Limpieza muestra de arena

La muestra de arena estaba formada por partículas de diferente tamaño, por tanto, se decidió tamizar la muestra y descartar aquellas partículas superiores a 100mm e inferiores a 0.08mm. Para ello se escoge 1 kg aproximadamente de muestra, se seleccionan dichos tamices, se vierte nuestra muestra y la se vibra a potencia 7 durante 10 minutos, tal y como aparece en la Figura 4.2.



Figura 4.2Criba de arena

Por último, seleccionamos la muestra de arena que queda en el tamiz 0.08 mm para la realización de los ensayos.

#### 4.1.1 Curva granulométrica

Para realizar este ensaño se utiliza la Norma UNE 103 101 antes descrita. Se selecciona 1kg de nuestra muestra previamente cribada y se hace pasar de orden descendente, de mayor a menor por los siguientes tamices: 0,63; 0,3; 0,2;0,15;0,106; 0,075; 0,063; 0,045mm. A continuación, se vibra durante 15 minutos a potencia 7, como aparece en la Figura 4.3.



Figura 4.3 Vibrado de muestra de arena.

Pasado este tiempo se procede a medir la masa de arena que se ha quedado retenida en cada tamiz, obteniendo así la Tabla 4.1

Tabla 4.1 Datos para la curva granulométrica.

Abertura tamiz (mm)	Peso parcial (g)	%Retenido	%Retenido acumulado	%Pasante acumulado
<b>0,63</b>	53,17	5,33	5,33	94,66
<b>0,3</b>	35,19	3,53	8,87	91,12
<b>0,2</b>	708,76	71,17	80,04	19,95
<b>0,15</b>	167,18	16,78	96,83	3,16
<b>0,106</b>	24,74	2,48	99,31	0,68
<b>0,075</b>	3,69	0,37	99,68	0,31
<b>0,063</b>	1,19	0,11	99,80	0,19
<b>0,045</b>	1,22	0,12	99,92	0,07
<b>FONDO</b>	0,72	0,0723	100	0
<b>TOTAL (g)</b>	995,86			



Manteniendo una temperatura constante de unos 20-25°C se llenan los tres picnómetros de agua hasta la línea de enrase, tal y como aparece en la Figura 4.6, la línea de enrase es la señalada por una flecha azul.

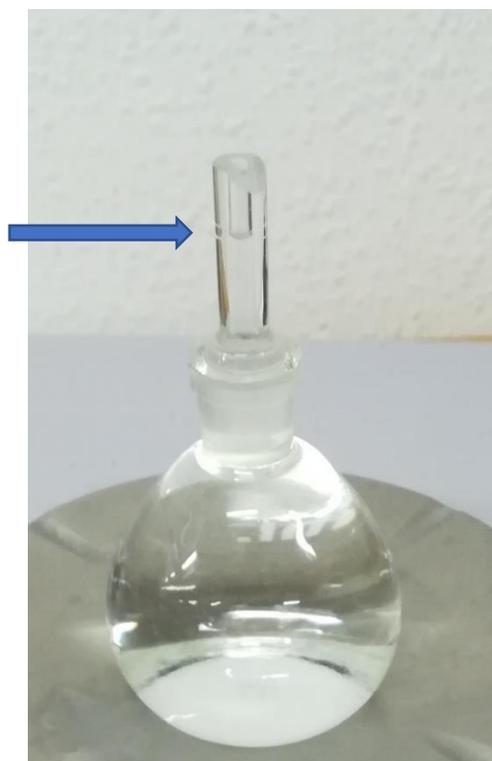


Figura 4.6 Picnómetro con agua hasta línea de enrase

Se mide la masa de cada uno de los tres picnómetros con el cuello puesto, ( $M_{1.1}$ ,  $M_{1.2}$ ,  $M_{1.3}$ ) y se apuntan las lecturas.

A continuación, se retira el cuello del picnómetro y se vacía el agua que este contenga hasta que quede aproximadamente la mitad de agua, como se ve en la Figura 4.7.



Figura 4.7. Picnómetros con la mitad de agua

Se procede a medir su masa sin el cuello del picnómetro puesto, obteniendo una tercera masa  $M_{2,1}$ ,  $M_{2,2}$ ,  $M_{2,3}$ .

El siguiente paso que se tendrá que realizar es verter la muestra de suelo al que hemos llamado MS1, MS2 y MS3, con ayuda de un embudo en el picnómetro con la mitad de agua. Queda como resultado, la Figura 4.8:

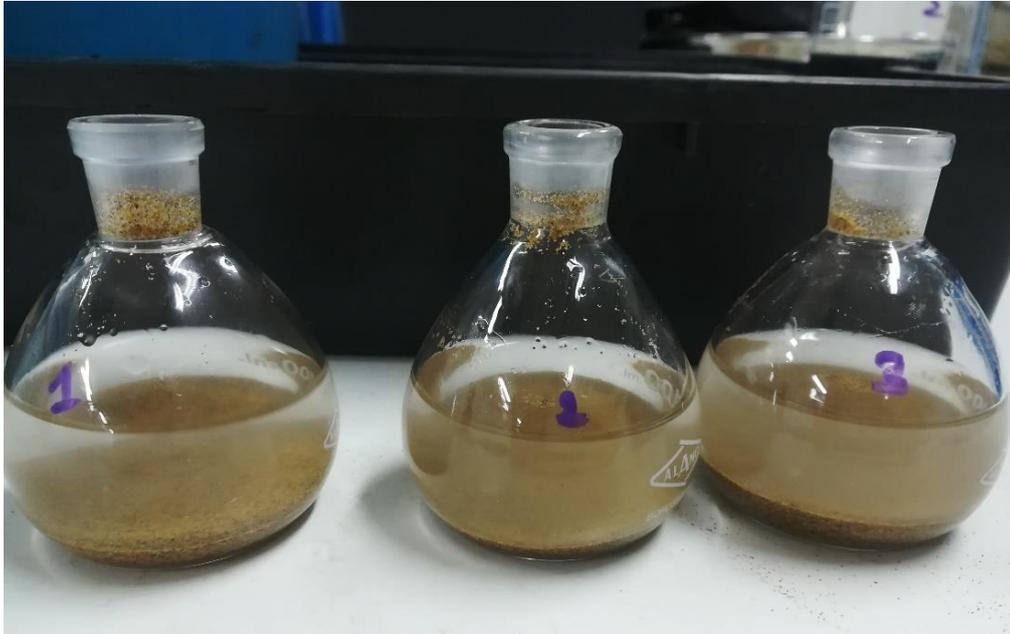


Figura 4.8 Picnómetro con arena y agua.

Procedemos a medir su masa, a la cual llamaremos  $M_{3,1}$ ,  $M_{3,2}$ ,  $M_{3,3}$ .

Por último, se llena el picnómetro con agua hasta la línea de enrase y se coloca el cuello, como aparece en la Figura 4.9 Y se determina su masa  $M_{4,1}$ ,  $M_{4,2}$ ,  $M_{4,3}$ .

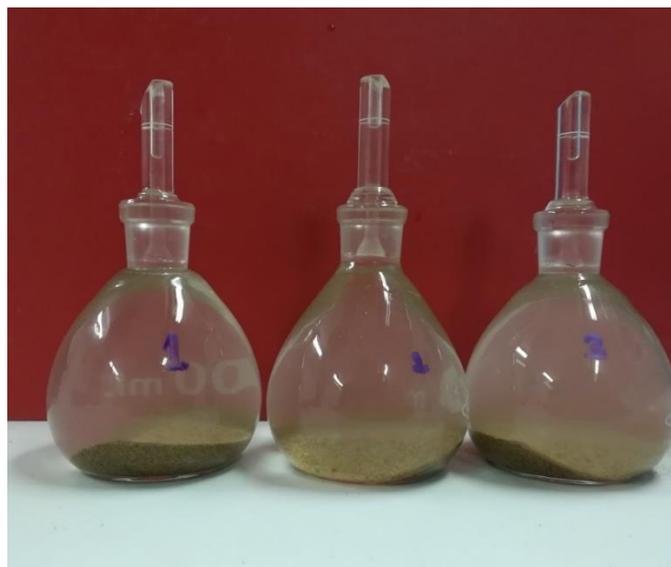


Figura 4.9 Picnómetro con arena y agua hasta línea de enrase.

Con todas las mediciones realizadas se procede a aplicar la siguiente fórmula para cada una de las porciones de arena que se ha separado en el punto 1.

$$G_s = \frac{M_{3,1} - M_{2,1}}{(M_{3,1} - M_{2,1}) + (M_{1,1} - M_{4,1})}$$

Las mediciones de las masas y los resultados de cada  $G_s$  vienen detalladas en la Tabla 4.2

Tabla 4.2 Valores para obtener  $G_s$

M1	M2	M3	M4	GS
170,4	115,61	130,5	179,96	2,794
152,74	98,13	113,16	162,35	2,773
171,37	116,32	135,82	183,84	2,774

Como  $G_s$  de la muestra se adoptará la media aritmética de los 3 ensayos: 2,780

#### 4.1.3 Arena densidad mínima, porosidad máxima

Se seguirá la Norma UNE 103-105-93 para la determinación de la densidad mínima de la arena. Se harán tres ensayos con diferentes muestras para obtener una media aritmética de las densidades. Se seguirán los pasos que se detallan a continuación:

Se seleccionan 2kg de arena (Figura 4.10) previamente cribada mediante el procedimiento antes descrito y se divide en 4 porciones aproximadamente iguales.



Figura 4.10 Muestra arena para densidad mínima

Será conveniente medir el diámetro y la altura del recipiente que se vaya a emplear con un pie de rey o una regla (Figura 4.11), para posteriormente hallar su volumen.



Figura 4.11 Recipiente empleado en ensayo densidad mínima y pie de rey.

Tras medir el diámetro y la altura se podrá hallar el volumen del recipiente con la siguiente expresión:

$$V = \frac{\pi * R^2}{4} * H; \text{ cuyo resultado se expresará en dm}$$

Se obtienen 3 valores de volumen, uno para cada recipiente. También será conveniente obtener la masa de los recipientes, a los cuales se denominaran  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$ .

Para realizar este ensayo, se vierte la muestra en el molde con ayuda del embudo de la siguiente manera: se coloca el dedo en la parte inferior del embudo y se vierte la muestra de suelo. Se quita el dedo y se vierte la muestra dentro del recipiente con la menor altura posible hasta formar un cono cuyo vértice coincida con el extremo superior del recipiente.

Se enrasa la arena con la boca del molde evitando la compactación de la arena. Al terminar este proceso se mide la masa de la muestra se le denominará  $M_{2,1}$ ,  $M_{2,2}$  y  $M_{2,3}$

Con la siguiente expresión se determina la densidad mínima:

$$\rho_{\min} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

Se obtienen los siguientes valores mostrados en la Tabla 4.3

Tabla 4.3 Valores para obtener densidad mínima.

	Diámetro	Altura	Volumen	Masa 1	Masa 2	Dens. Min. (kg/dm <sup>3</sup> )
Muestra 1	0,6	0,61	0,172	0,033	0,293	1,509
Muestra 2	0,6	0,6	0,170	0,033	0,289	1,509
Muestra 3	0,6	0,597	0,169	0,033	0,295	1,557
Muestra 4	0,6	0,6	0,170	0,033	0,292	1,527
					Dens. Media	1,525

La densidad será 1.525 kg/dm<sup>3</sup>

#### 4.1.4 Arena densidad máxima, porosidad mínima.

Para realizar este ensayo se utilizará la Norma UNE 103-106-93. Como no se dispone del material que nos exige la Norma para realizar este ensayo, se utilizará un material parecido. Se determinará la densidad máxima mediante dos métodos que describiremos a continuación:

- Método 1. Apisonado

Se seleccionan cuatro recipientes como los utilizados en el ensayo de densidad mínima de una arena y se mide su masa. Se anotan las masas de los cuatro recipientes.  $M_{1,1}$ ,  $M_{1,2}$ ,  $M_{1,3}$ ,  $M_{1,4}$

Se determinan las dimensiones de los recipientes con el método descrito en el apartado anterior y se hallará su volumen con la siguiente expresión:

$$V = \frac{\pi * R^2}{4} * H; \text{ cuyo resultado se expresará en dm}$$

Procedemos a verter en pequeñas capas la muestra de arena, a continuación, se humedece y se compacta mediante el golpeo de un mazo. Se continua con el proceso hasta que la muestra de arena quede completamente compactada y enrasada con el borde del recipiente, como se muestra en la Figura 4.12.



Figura 4.12. Arena compactada para determinar densidad máxima método 1

Después de este proceso es conveniente desecar la muestra en la estufa para así eliminar toda la humedad que ésta pueda contener. Para ello se utilizará la estufa disponible en el laboratorio y a una temperatura de 110°C se introduce la muestra y se deja durante 1 hora (Figura 4.13). Se sacan las muestras y se mide su masa



Figura 4.13 Muestra de arena dentro de estufa

Se vuelve a introducir las cuatro muestras dentro de la estufa y se dejan durante 24h. Transcurrido este tiempo, se sacan las muestras y se anota su masa, junto a las de 1h en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Valores para obtener densidad máxima método 1

	Díámetro	Altura	Volumen	Masa 1 M1	Masa 2 (1h)	Masa 2(24h)	Densidad Kg/dm <sup>3</sup>
Muestra 1	0,6	0,61	0,172	0,032	0,354	0,325	1,694
Muestra 2	0,6	0,6	0,169	0,033	0,343	0,326	1,728
Muestra 3	0,6	0,59	0,168	0,032	0,345	0,323	1,720
Muestra 4	0,6	0,6	0,169	0,032	0,330	0,319	1,691

Asumimos que transcurridas las 24h se ha eliminado toda la humedad que contenía la arena.

Se utiliza esta expresión para determinar la densidad máxima de cada muestra

$$\rho_{\max} = \frac{(M_2 - M_1)}{V} \text{ en kg/dm}^3$$

Como valor de densidad máxima, se escoge la media de las tres muestras: 1,708 kg/dm<sup>3</sup>

#### - Método 2. Vibración

Otro método que se decide emplear para determinar la densidad máxima de las partículas de un suelo es la compactación mediante vibración.

Para ello se utilizan los mismos moldes que se han visto hasta ahora.

Se seleccionan 2kg aproximadamente de la muestra inicial y se divide en cuatro porciones.

Se cogen los recipientes metálicos y en cada uno de ellos se vierte 120g de muestra, Figura 4.14, con la tapa puesta se procede a vibrarlos durante 6 minutos a potencia 8



Figura 4.14. 120g de muestra para densidad máxima método 2

Una vez transcurrido este tiempo se extraen los recipientes del vibrador y se vierte otros 120g en ellos, se pone la tapa y se vuelve a vibrar a la misma potencia y tiempo. Figura 4.15



Figura 4.15. Vibrado para obtener densidad máxima método 2

Cuando pasen los 6 minutos se vierte el resto de muestra hasta llenar el recipiente, se deja una pequeña montaña de arena para que, al vibrarlo por última vez, este se enrase. Se vibra a la misma potencia y tiempo.

Se saca la muestra del vibrador y se mide su masa  $M_{2,1}$ ,  $M_{2,2}$ ,  $M_{2,3}$ ,  $M_{2,4}$

Utilizando la expresión que se detalla a continuación se obtiene la densidad de las cuatro muestras, reflejados en la Tabla 4.5

$$\rho_{\max} = \frac{(M_2 - M_1)}{V} \text{ en kg/dm}^3$$

Tabla 4.5 Valores para obtener densidad máxima método 2

	Diametro	Altura	Volumen	Masa 1	Masa 2	densidad
<b>Muestra 1</b>	0,6	0,61	0,1725	0,0329	0,3330	1,7400
<b>Muestra 2</b>	0,6	0,6	0,1696	0,0334	0,3343	1,7732
<b>Muestra 3</b>	0,6	0,597	0,1688	0,0326	0,3360	1,7973
<b>Muestra 4</b>	0,6	0,6	0,1696	0,0325	0,3338	1,7761

Como densidad de la muestra se adopta la media de las cuatro:  $1,7716 \text{ kg/dm}^3$

Una vez finalizados estos dos métodos, se puede ver que las densidades son similares,  $1,7086 \text{ kg/dm}^3$  del método primero frente a los  $1,7716 \text{ kg/dm}^3$  del método segundo.

Al ver que el segundo método proporcionaba un valor más alto, se decide repetir el mismo ensayo, pensando que podría haber sido por un error en la realización del ensayo. Finalmente se obtuvo un resultado muy similar.

## 4.2 Ensayos EPS.

### 4.2.1 Preparación de las muestras

Para realizar los ensayos correspondientes al EPS (poliestireno expandido) seleccionamos una porción de bloque de EPS disponible en el laboratorio de Geotecnia de la UPCT. En dicho laboratorio existen dos bloques con dos densidades diferentes, el primero con una densidad de  $20 \text{ kg/m}^3$  y segundo con una densidad de  $40 \text{ kg/m}^3$ .

Se decide escoger el EPS con una densidad de  $20 \text{ kg/m}^3$ , como el que aparece en la Figura 4.16 ya que como tiene unas perlas de EPS mayores resultará más fácil de desmigarlo.



Figura 4.16 Muestra de EPS con densidad  $20 \text{ kg/m}^3$

Para este estudio se necesita que las partículas de EPS sean de un tamaño muy pequeño y homogéneo, para ello se desmiga el bloque inicial con ayuda de un colador disponible en el laboratorio. Como resultado de este proceso se obtiene un EPS como el que aparece en la Figura 4.17



Figura 4.17 EPS desmigado.

#### 4.2.2 Densidad del material. Procedimiento de obtención.

No existe ningún procedimiento para determinar la densidad del EPS, pero como es una propiedad que se debe conocer se procede de la siguiente manera para poder hallarla.

Se determina el volumen del recipiente que se vaya a utilizar, que será el de la Figura 4.18, en este caso no tiene una forma adecuada que se pueda medir con un pie de rey. Por tanto, para determinar sus dimensiones se procede a llenarlo de agua y sacar su volumen.

Previamente se mide la masa del recipiente vacío y seco obteniendo así:  $M_{(\text{recipiente})}$ . Se realiza otra medición cuando se tenga tengamos lleno de agua y se le llamará  $M_{(\text{recipiente+agua})}$ .

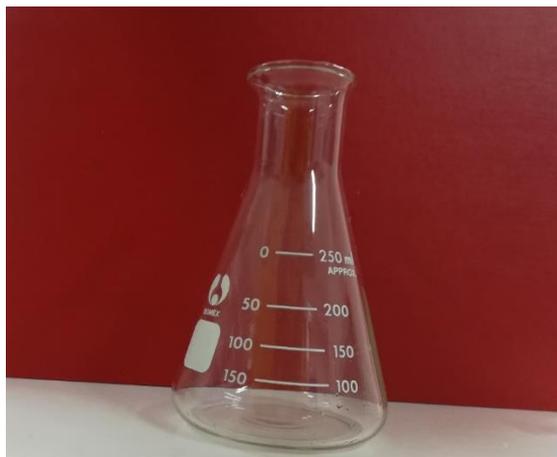


Figura 4.18. Recipiente empleado en determinación densidad EPS

Haciendo la diferencia  $M_{(\text{recipiente+agua})}$  y  $M_{(\text{recipiente})}$  se obtiene el peso de agua que este contiene, que multiplicándolo por la densidad del agua se tiene el volumen de agua.

Se procedemos a operar con el EPS, para ello se seca el recipiente de la Figura 4.19 y se llena de EPS previamente desmigado mediante el proceso descrito en el apartado 4.2.1.



Figura 4.19. Recipiente con EPS

Se pesa el conjunto del recipiente y el EPS, Figura 4.20 obteniendo así  $M_{(\text{recipiente}+\text{EPS})}$

A continuación, se procede a llenar con agua los huecos que puedan quedar en el recipiente, consiguiendo así que todos los espacios que deja el EPS estén ocupados por agua.



Figura 4.20 Llenado de la muestra con agua



Figura 4.21. Tapa empleada

Desde la figura 4.21 hasta la 4.23 se muestra el proceso llevado a cabo.

Se coloca encima del recipiente una pequeña tapa hecha con film transparente para evitar que se salga el EPS en la realización del ensayo, ya que no se ha encontrado ningún elemento que haga esta función.



Figura 4.22 Muestra con EPS y agua

Se mide la masa del EPS y del agua que contiene el recipiente, obteniendo  $M_{(\text{Reccipiente}+\text{EPS}+\text{agua})}$ .

Se ha repetido este proceso dos veces, para así obtener dos valores de densidades.



Figura 4.23. Dos muestras con agua y EPS

Con todos los datos que se tienen, Tabla 4.6, se procede a operar de la siguiente manera.

Tabla 4.6. Datos obtenidos del ensayo de densidad del EPS

	$M_{(recipiente)}$	$M_{(recipiente+agua)}$	$M_{(recipiente+EPS)}$	$M_{(Reccipiente+EPS+agua)}$ .	Masa tapa
ENSAYO 1	97,74g	427g	101,22g	282,29g	0,03g
ENSAYO 2	98,95g	429,29g	102,46g	282,86g	0,04g

Se obtiene el volumen del recipiente haciendo la siguiente diferencia y multiplicándolo por la densidad del agua, obteniendo así la Tabla 4.7

$$V_{recipiente} = M_{(recipiente + agua)} - M_{(recipiente)} * 1g/cm^3$$

Tabla 4.7 Datos volumen recipiente

	Volumen recipiente
ENSAYO 1	329,26
ENSAYO 2	330,34

Se hace la diferencia de  $M_{(recipiente +EPS)}$  y  $M_{(recipiente)}$  obtenemos la masa de EPS, reflejada en la tabla 4.8

Tabla 4.8 Datos masa EPS

	Masa EPS
ENSAYO 1	3,48
ENSAYO 2	3,51

A continuación, para hallar el volumen de agua que se necesita para que todos los huecos de EPS estén ocupados por agua, se hace:

$$V_{Agua2} = M_{(Reccipiente + EPS+ agua)} - M_{(recipiente +EPS)} - M_{(recipiente)} * 1g/cm^3$$

Obteniendo así los valores de en la Tabla 4.9

Tabla 4.9 datos volumen agua 2

	Volumen agua 2
ENSAYO 1	181,07
ENSAYO 2	180,4

Para hallar el volumen del EPS se realiza la diferencia de  $V_{recipiente}$  y  $V_{Agua2}$ , obteniendo así los valores reflejados en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 datos volumen EPS

Volumen EPS	
ENSAYO 1	148,19
ENSAYO 2	149,94

Por último, para obtener la densidad, se utiliza esta expresión que aparece a continuación, y los datos se verán reflejados en la Tabla 4.11

$$\text{Densidad (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Masa EPS}}{\text{Volumen EPS}}$$

Tabla 4.11 Valor densidad

	Dens. EPS (g/cm3)	Kg/m3
ENSAYO 1	0,02348337	23,4833659
ENSAYO 2	0,02340936	23,4093637

Como densidad de EPS se adoptará la media de esos dos valores: 23.44 kg/m3

### 4.3 Muestras para ensayo edométrico.

Para realizar en ensayo edométrico se ha preparado dos muestras, cada una de ellas con distintas proporciones de arena y EPS, para que así se estudiar de manera más generalizada el comportamiento de esta mezcla.

#### 4.3.1 EPS al 0.2 %

La muestra tiene que contener un 0.2% de EPS, para ello, se realizan los cálculos necesarios para saber qué cantidad habría que verter de cada elemento para obtener dicho porcentaje.

Se optó por seleccionar 100g de arena de nuestra muestra inicial y 0.2g de EPS desmigado. Tal y como aparece en la figura 4.24 y 4.25



Figura 4.24. Muestra de arena para ensayo.

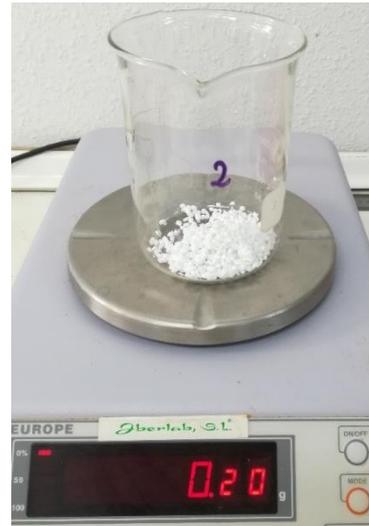


Figura 4.25. Muestra EPS para ensayo

Finalmente se mezcla la arena y el EPS (Figura 4.26) obteniendo así la primera muestra a la que se le va a someter un ensayo edométrico.

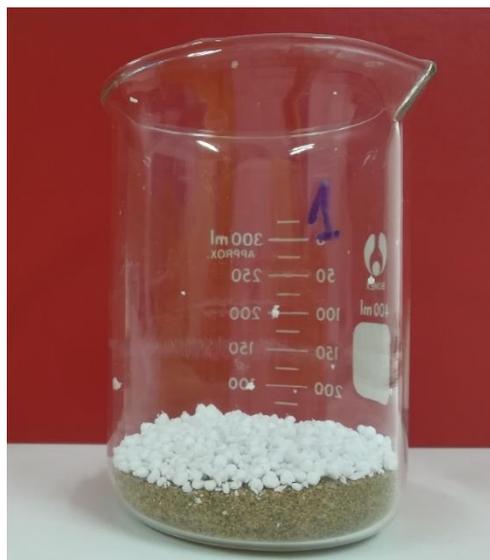


Figura 4.26. Muestra para ensayo edométrico

#### 4.3.2 EPS al 1 %

Se realiza el mismo procedimiento descrito en el apartado 4.3.1 para obtener la muestra con 1 % de EPS.

Se selecciona 100g de arena y 1g de EPS. Tal y como aparece en la Figura 4.27

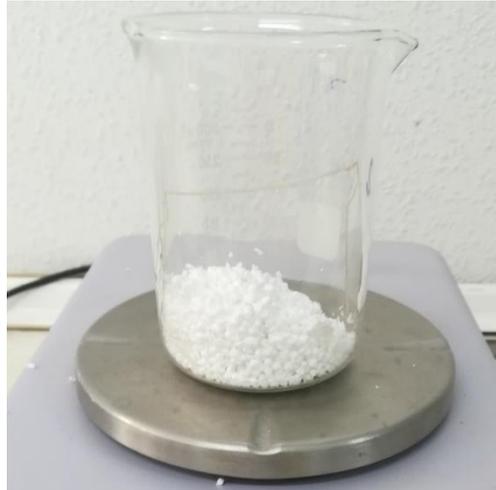


Figura 4.27 Muestra con 1g de EPS

Como resultado final obtenemos 101g de muestra que se utilizara para el ensayo edométrico (Figura 4.28)

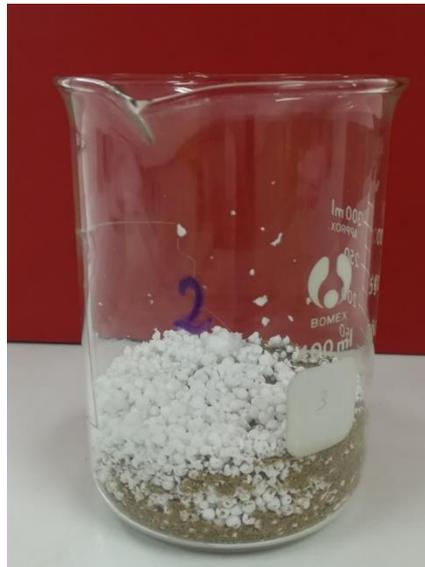


Figura 4.28. Muestra para ensayo edométrico, con 1% de EPS.

## 5 ENSAYO EDMÉTRICO

### 5.1 Preparación del ensayo y procedimiento

Se llevarán a cabo cuatro ensayos edométricos, dos para cada muestra.

El primer ensayo que se realizará será simulando una carga de 5 metros de terraplén. Para determinar los escalones de carga primero se deberá determinar el área del anillo edométrico. Se mide su diámetro, y mediante la siguiente fórmula se determina su área:

$$A = \pi r^2 = 0.002 \text{ m}^2$$

Se supone una densidad para el terraplén de  $20 \text{ KN/m}^3$  y al multiplicarla por los 5 metros de terraplén se obtiene que la tensión máxima que se le aplicará será de  $100 \text{ KN/m}^3$

El próximo paso que se debe realizar será transformar esos  $100 \text{ KN/m}^2$  en kg

$$100 \text{ KN/m}^3 * 1000 \text{ N/m}^3 * 0.1 \text{ kg/N} * 0.002 \text{ m}^2 * 0.1 = 2\text{kg}$$

La máxima carga que se aplicará a la muestra será de 2kg

Se establecen cuatro escalones de cargas que se le aplicará a la bancada. Para el primer ensayo se establecen cuatro escalones (Tabla 5.1)

Tabla 5.1. Escalones de carga que se aplican al primer ensayo edométrico

Escalones	Carga
Escalón 1	0.25 kg
Escalón 2	0.5 kg
Escalón 3	1 kg
Escalón 4	2 kg

Se procede a preparar las dos muestras, la primera con un 0,2 % de EPS y la segunda con un 1% de EPS.

Se llenan los dos anillos edométricos con las muestras tal y como aparece en la figura 5.1



Figura 5.1 Muestra de arena y EPS en anillo edométrico

A continuación, se coloca la célula edométrica y se ajusta el yugo. También se colocan los transductores en su posición para que este ensayo pueda quedar registrado en el Metatest, quedando dicho conjunto representado en la Figura 5.2



Figura 5.2 Célula edométrica y transductor colocado.

Se aplican las cargas que se han establecido en la Tabla 5.1 de manera que cada carga este aplicada durante 24h. Transcurrido este tiempo se procederá a aplicar la siguiente carga, hasta completar el ciclo de carga.



Figura 5.3. Edómetro en funcionamiento.

Transcurridos estos días se procede a la recogida de datos y a la preparación del siguiente ensayo edométrico.

Para los dos últimos ensayos edométricos se realizará una modificación en los escalones de cargas y el tiempo que se van a mantener dichas cargas.(Tabla 5.2)

Tabla 5.2 Escalones que se aplicarán al segundo ensayo edométrico

Escalón	Carga
Escalón 1	0.5kg
Escalón 2	2kg

Cada escalón de carga se dejará durante 48h. Transcurrido este tiempo se aplicará la siguiente. Se recogerán los datos transcurrido este tiempo.

## 5.2 Ensayo muestra 0.2 %

### 5.2.1 Ensayo 1

El primer ensayo que se ha realizado a la muestra que contiene un 0.2 % de EPS es aplicando como máximo 2kg. Para ello se establecen cuatro escalones de carga, los detallados en la Tabla 5.1

Cada escalón se deja actuar 24 horas, registrando mientras las deformaciones que se producen en la muestra con la máquina de registro Metatest.

Dicha maquina nos permite registrar deformaciones cada segundo, para las primeras horas, y posteriormente registros cada 60 segundos para el resto del tiempo.

Con los datos que proporciona Metatest se ha elaborado una tabla en Excel y posteriormente una gráfica (Figura 5.4) que pueda ilustrar las deformaciones que se producen en la muestra de EPS y arena.

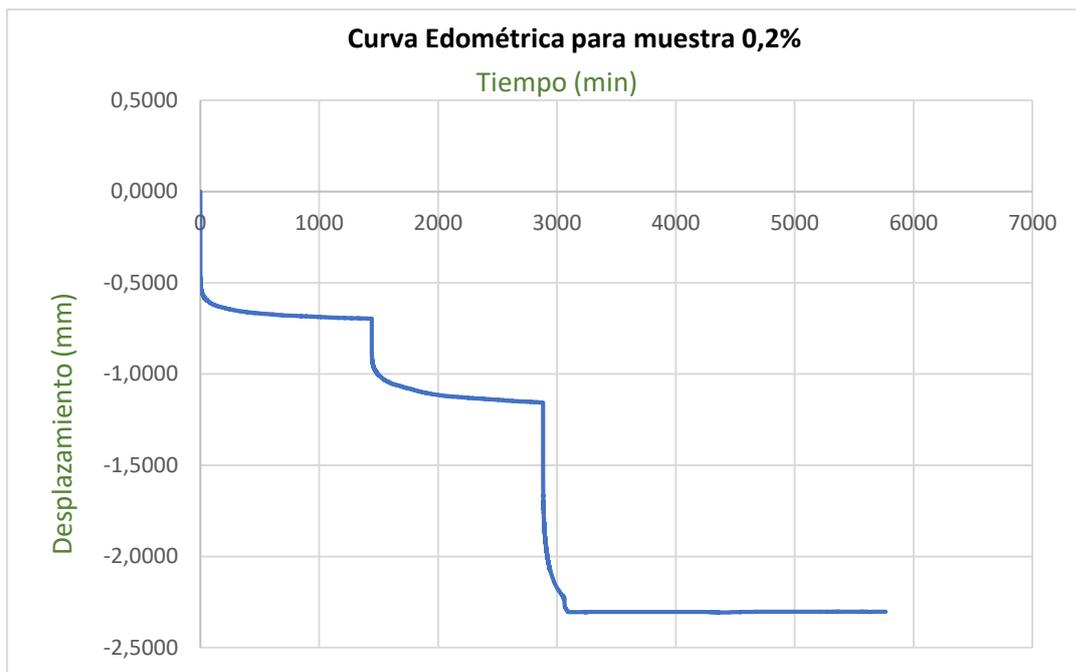


Figura 5.4 Curva edométrica 1 con muestra de EPS 0.2%

Quedan ilustradas las deformaciones o el desplazamiento medido en milímetros que se producen en la muestra de suelo tras aplicar cada escalón de carga, de manera que:

Para el primer escalón de carga se obtuvo una deformación de 0.608 mm. Pasadas las 24 horas se aplicó la siguiente carga, obteniéndose una deformación de 1.026mm. Trascurridas otras 24 horas se aplicó otra carga, produciéndose una deformación de 2.23 mm y tras aplicar el último escalón se alcanzan los 2.3mm. La deformación máxima que se produce en este ensayo es de 2.305 mm.

A continuación, se hallará el módulo edométrico para cada escalón de carga, habiendo transformado previamente las cargas aplicadas en tensiones, medidas en kPa. Dichos resultados quedan reflejados en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Tabla resultados ensayo edométrico 1, 0,2%

Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
12,5	0.608
25	1.026
.50	2.23
100	2.3

Utilizando la siguiente expresión se podrá determinar el módulo edométrico para cada escalón de carga.

$$E_m = \frac{\Delta\sigma'_v}{\delta\varepsilon_v} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Donde,

$\Delta\sigma'_v$  es el incremento de tensión que se aplica,

$\delta\varepsilon_v$  es el desplazamiento medido en metros que se produce.

Obtenemos los resultados mostrados en la Tabla 5.4

Tabla 5.4 Resultados Módulo edométrico

$E_{m1}$	$E_{m2}$	$E_{m3}$
879,18 kPa	601,62 kPa	19835,7 kPa

La media que se obtiene es de 7105,5 kPa

### 5.2.2 Ensayo 2

En el segundo ensayo edométrico realizado en esta muestra varían los escalones de carga y el tiempo de aplicación.

Se aplicaron dos escalones de carga, el primero de 0.5 kg, dejándolo actuar durante 48 horas, y el segundo de 1.5 kg dejándolo actuar otras 48 horas, obteniendo, así como carga final aplicada 2kg.

Se registraron los ensayos en la maquina Metatest y con los datos proporcionados se elaboró la gráfica de la Figura 5.5

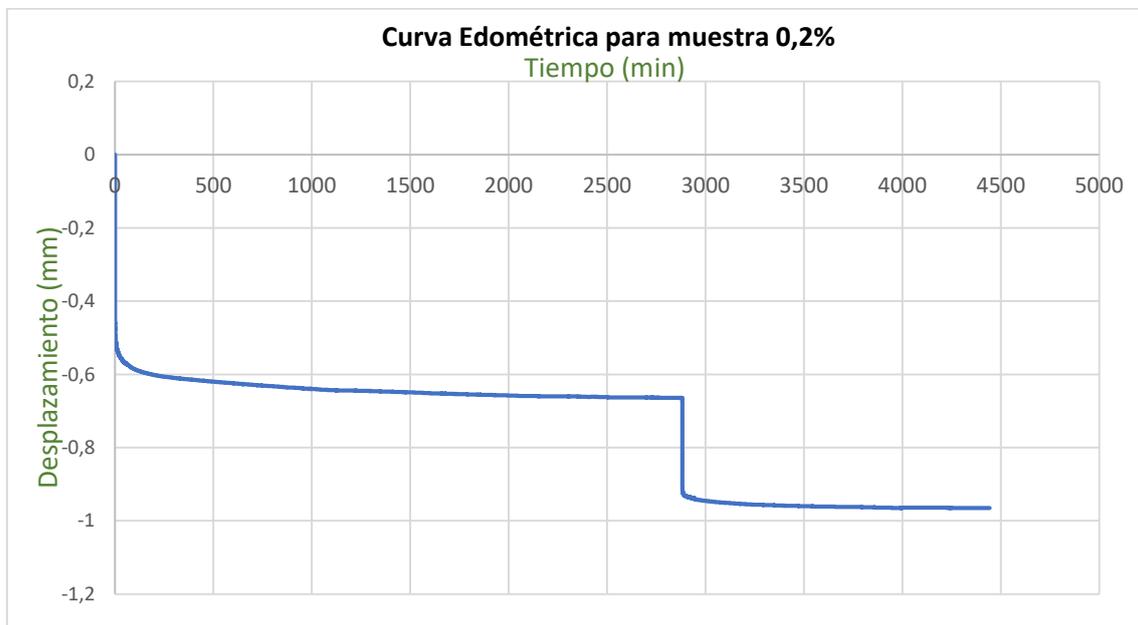


Figura 5.5 Curva edométrica 2 con muestra de EPS 0.2%

Al aplicar la primera carga se produce una deformación de 0.568mm. Trascurridas las 48h se le aplica el siguiente escalón de carga, produciéndose así una deformación de 0.942.

En la Tabla 5.5 quedan reflejados las tensiones aplicadas y los desplazamientos producidos.

Tabla 5.5, Tabla resultados ensayo 2, con EPS 0.2%

Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
25	0.568
100	0.942

Con los datos de tensión y desplazamiento, y con el método explicado en el punto 5.2.1 se determina el módulo edométrico para este ensayo. Se obtienen dos módulos edométricos (Tabla 5.6)

Tabla 5.6 Resultados Modulo edométrico para ensayo 2 con EPS 0.2%

$E_{m1}$
5902,14 kPa

### 5.3 Ensayo muestra 1.0

#### 5.3.1 Ensayo 1

Se procedió de la misma manera que en el punto 5.2.1 para realizar los ensayos edométricos de esta muestra. Se obtuvo la gráfica ilustrada en la Figura 5.6.



Figura 5.6. Curva edométrica 1 con muestra 1% EPS

En este ensayo se puede observar que tras aplicar el primer escalón de carga se produce una deformación de 0.115mm. Transcurridas las 24 horas se procede a aplicar la siguiente carga, registrándose una deformación de 0.173mm. Al aplicar la siguiente carga se produce una deformación de 0.257. Se aplica el último escalón de carga y se obtiene una deformación de 0.399mm. Por último, la deformación máxima que se obtiene en el ensayo es de 0.429 mm

En la Tabla 5.7 Se puede observar la transformación de las cargas a tensiones y el desplazamiento que se produce para cada escalón de carga

Tabla 5.7. Tabla resultados ensayo 1, con EPS 1%

Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
12,5	0.115
25	0.173
.50	0.257
100	0.399

Con los datos que se tienen para este ensayo se procede a calcular el módulo edométrico para cada escalón de carga, obteniéndose los resultados de la Tabla 5.8

Tabla 5.8.Tabla resultados ensayo 1, con EPS 1%

$E_{m1}$	$E_{m2}$	$E_{m3}$
6440,73 kPa	8877,08 kPa	10473,88 kPa

La media del módulo edométrico obtenida es de 8596,87 kPa.

### 5.3.2 Ensayo 2

Del mismo modo que se operó en el punto 5.2.1 obtenemos la Figura 5.7

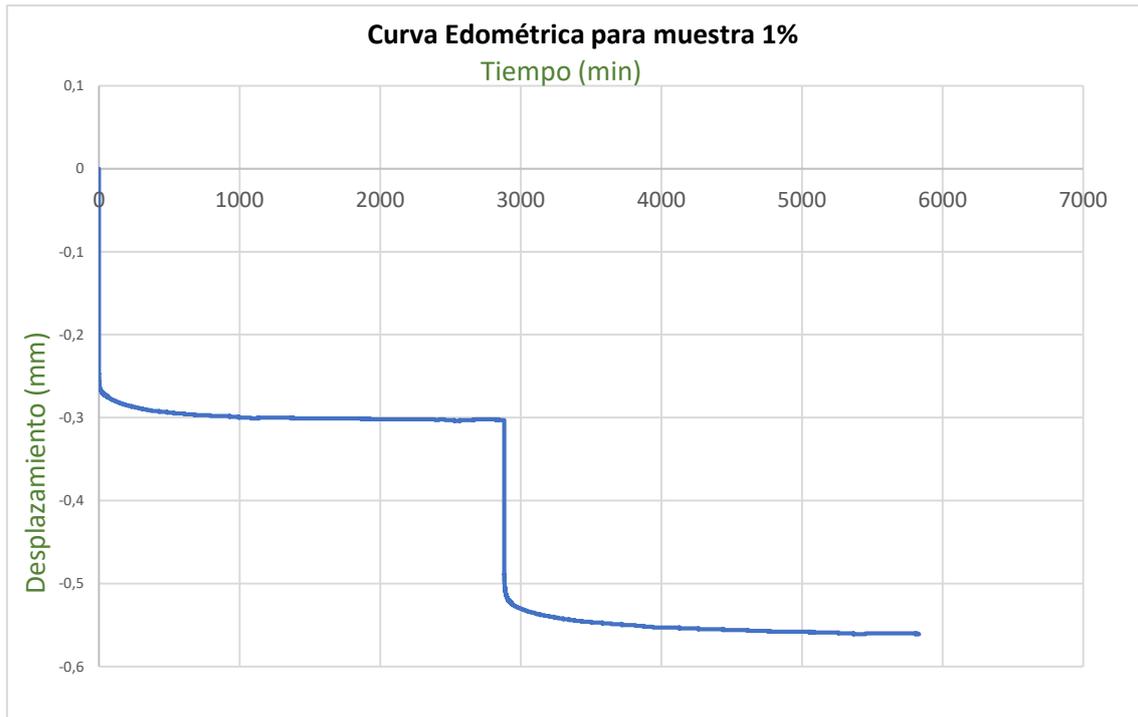


Figura 5.7 Curva edométrica 2 con muestra EPS 1%

Cuando se aplica el primer escalón de carga se produce una deformación de 0.297mm. Se deja actuar 24h y se aplica el siguiente escalón de carga, obteniéndose un desplazamiento o deformación de 0.53mm. El máximo desplazamiento que se produce en este ensayo es de 0.56mm.

En la Tabla 5.9 Se puede observar la transformación de las cargas a tensiones y el desplazamiento que se produce para cada escalón de carga

Tabla 5.9 tabla resultados ensayo2, con EPS 1%

Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
25	0.297
100	0.53

Con los datos que se tienen para este ensayo se procede a calcular el módulo edométrico para cada escalón de carga, obteniéndose los resultados de la Tabla 5.10

Tabla 5.10 Resultados modulo edométrico, ensayo 2, con EPS 1%

$E_{m1}$
9561,05 kPa

## 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Una vez finalizados todos los ensayos descritos anteriormente, es necesario analizar y contrastar los resultados obtenidos con la bibliografía disponible y mencionada anteriormente.

Dentro de los ensayos realizados a la arena, y concretamente el valor del Gs, el libro “*Mecánica de suelos–Propiedades físicas y químicas de los suelos más utilizados en ingeniería*” (Berry, P., & David, R 1993) aparece un valor de Gs de 2,65. El valor que se ha obtenido en los ensayos es de 2.78, un valor por encima del que aparece en dicho libro, pero aceptable.

En cuanto al tamaño de partículas, según la Norma británica, AASHTO y ASTM (Figura 6.1) se puede clasificar en una arena, ya que el tamaño de las partículas de la muestra está comprendido entre 0.6 y 0.2 mm.

Descripción de las partículas	Tamaño de las partículas (mm)			
	Normas británicas <sup>†</sup>	AASHTO <sup>‡</sup>	ASTM <sup>§</sup>	Unificado <sup>¶</sup>
Grava	60–2	75–2	> 2	75–4.75
Arena	2–0.06	2–0.05	2–0.075	4.75–0.075
Limo	0.06–0.002	0.05–0.002	0.075–0.005	< 0.075 finos
Arcilla	< 0.002	< 0.002	< 0.005	

Figura 6.1. Fuente: *Mecánica de suelos*, Berry, 1993

Se recurre también al libro “*Mecánica de suelos*” (Lambe, T. W. y Whitman, R. V. 2006) para clasificar la arena. En este se establece que una arena debe tener un tamaño de partícula comprendido entre 0.06 y 2 mm, valor que también cumple la arena del ensayo.

Para analizar la densidad máxima y la densidad mínima de la muestra de arena se utiliza el libro “*Mecánica de suelos–Propiedades físicas y químicas de los suelos más utilizados en ingeniería*” (Berry, P et David, R 1993), Figura 6.2. El valor de densidad mínima es de 1.525 kg/dm<sup>3</sup>, un poco superior al que ofrece la bibliografía citada. En cuanto a la densidad máxima, los valores que se han obtenido mediante los dos métodos son de 1,77 kg/dm<sup>3</sup> y 1,7 kg/dm<sup>3</sup>. El primer método proporciona un valor más aceptable que el segundo.

Descripción	Porosidad n (%)	Relación de vacíos e	Contenido de humedad S <sub>v</sub> = 1 w (%)	Densidad (Mg/m <sup>3</sup> )	
				ρ <sub>d</sub>	ρ <sub>s</sub>
Arena uniforme suelta	46	0.85	32	1.44	1.89
Arena uniforme densa	34	0.51	19	1.75	2.08
Arena bien gradada suelta	40	0.67	25	1.59	1.98
Arena bien gradada densa	30	0.43	16	1.86	2.16
Tilita glacial bien gradada	20	0.25	9	2.11	2.32
Arcilla glacial blanda	55	1.20	45	1.21	1.76
Arcilla glacial dura	37	0.60	22	1.69	2.06
Arcilla ligeramente orgánica blanda	66	1.90	70	0.92	1.57
Arcilla muy orgánica blanda	75	3.00	110	0.68	1.43
Arcilla montmorilonítica blanda (bentonita)	84	5.20	194	0.44	1.28
Turba amorfa	91	10	500	0.18	1.09
Turba fibrosa	94	15	1,000	0.09	1.03

Figura 6.2 Fuente: mecánica de suelos Berry, 1993

En cuanto al EPS, otro material que se ha empleado en este proyecto, se obtuvo una densidad de 23.44 kg/m<sup>3</sup>. Los dos bloques de EPS disponibles en el laboratorio de geotecnia tienen una densidad de 20 kg/m<sup>3</sup> y 40 kg/m<sup>3</sup>, valores de densidades proporcionados por el fabricante. Dado que la densidad obtenida mediante el procedimiento descrito anteriormente se encuentra dentro de estos dos valores, se puede considerar correcto el método empleado y los resultados obtenidos.

Para conocer el comportamiento de la arena y el EPS en conjunto se decidió realizar un ensayo edométrico para saber cómo se deforma dicha mezcla y se obtuvo el módulo edométrico en cada ensayo realizado.

En el libro “Mecánica de suelos–Propiedades físicas y químicas de los suelos más utilizados en ingeniería” (Berry, P et David, R 1993), aparece un módulo edométrico de una arena comprendido entre 10350 – 24150 kPa.

Se ha determinado también el módulo edométrico del EPS con densidad inicial 20 kg/m<sup>3</sup> gracias a la información obtenida del trabajo de fin de máster “Investigating material characteristics of EPS geof foam with different laboratory methods” (Maria Encarnación Martínez Moreno, 2018). En dicho trabajo se realizó un ensayo edométrico del EPS de 20 kg/m<sup>3</sup>, aplicando las tensiones y obteniendo las deformaciones que se muestran en la Tabla 6.1

Tabla 6.1. Tabla con resultados de deformaciones de ensayo edométrico. Fuente: TFM María Encarnación Martínez Moreno

Stress (kPa)	Vertical displacement (mm)	Deformation (%)
12	1.354	6.77
25	1.78	8.9
50	2.738	13.69
100	7.088	35.44

Se ha obtenido un módulo edométrico para cada escalón de carga (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Valores de módulo edométrico.

$E_{m0}$	$E_{m1}$	$E_{m2}$	$E_{m3}$
8862,63 kPa	30516,43 kPa	26096,03 kPa	11494,25 kPa

La media corresponde a 19242.34 kPa

En el trabajo *An investigation on the geotechnical properties of sand–EPS mixture using large oedometer apparatus* (Chenari, R. J. et al, 2016), se realizó un ensayo edométrico para distintas proporciones de arena y EPS. Las proporciones de EPS que se utilizaron fueron 0.1; 0.2; 0.3; 0.5; y 1% de EPS. Los escalones de carga aplicados fueron 160, 260 y 375 kPa. Se obtuvo la gráfica que se muestra en la Figura 6.3

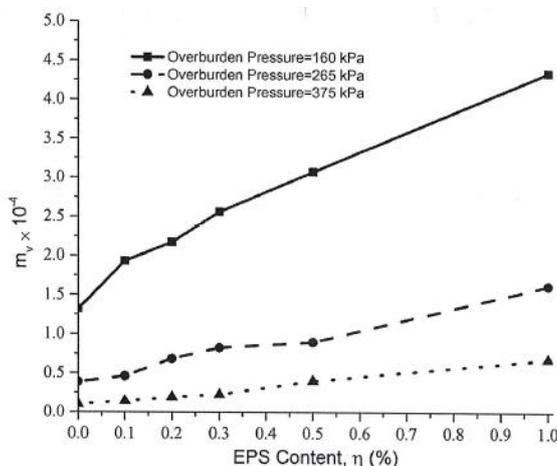


Figura 6.3 Fuente: *An investigation on the geotechnical properties of sand–EPS mixture using large oedometer apparatus* (Chenari, R. J. et al, 2016),

A partir de los datos que aparecen en la gráfica, se ha obtenido el módulo edométrico para la muestra que contiene 0.2 y 1%, y para una tensión de 160 y 375 kPa, lo que más se asemeja a este proyecto. Sabiendo que  $E_m = \frac{1}{m_v}$  se obtiene los módulos edométricos que se muestran en la Tabla 6.3, para la muestra con 0,2% de EPS.

Tabla 6.3. Módulos edométricos obtenidos de bibliografía con EPS 0.2%

<b>E<sub>m1</sub> (160kPa)</b>	<b>E<sub>m2</sub> (375kPa)</b>
4545,45 kPa	200534,42 kPa

Los valores mostrados en la Tabla 6.4 para la muestra con un 1% de EPS.

Tabla 6.4 Módulo edométrico obtenido de bibliografía con EPS 1%

<b>E<sub>m1</sub> (160kPa)</b>	<b>E<sub>m2</sub> (375kPa)</b>
2347,417 kPa	16666,6 kPa

Con los módulos edométricos obtenidos de la arena, del EPS, de la mezcla de EPS y arena de este proyecto y de los ensayos del artículo, se puede llegar a la conclusión de que dicho módulo disminuye en función de la cantidad de EPS que la muestra contenga. El módulo de la arena ( $E_m=24150\text{kPa}$ ) es superior al módulo que se ha obtenido del EPS solo ( $E_m=614.3\text{ kPa}$ ). En los ensayos realizados con arena y EPS, si se compara el último escalón de carga de las dos muestras, se puede observar que se produce el mismo fenómeno: cuanta más cantidad de EPS contenga la muestra menor es el módulo edométrico. ( $E_{M\ 0.2\%}=19835.7\text{ kPa}$  frente a  $E_{M\ 1\%}=10473.88\text{ kPa}$ )

En los ensayos con muestras de arena y EPS se observa un aumento del módulo edométrico en el último escalón de carga, ya que la deformación que se produce es más pequeña que en los escalones previos (la muestra se rigidiza).

Este fenómeno se debe a que inicialmente la muestra alcanza una deformación mayor debido al reajuste en el volumen de vacíos de las partículas de arena y a la deformación plástico-elástico del EPS. Se llega a la conclusión de que no existe una relación lineal entre la carga aplicada y la deformación producida.

Cuando se procede a la comparación entre los módulos edométricos extraídos del artículo y los que se obtienen en este proyecto, se puede observar que los módulos edométricos se encuentran dentro del mismo orden de magnitud, aunque el dato procedente del artículo es menor que el que se obtiene en este trabajo. Dicho fenómeno puede deberse a que las cargas que aplican en el artículo (160, 260 y 375 kPa) son mayores que las que se aplican en este trabajo. Se desconoce también si en el trabajo que recoge el artículo las cargas se aplican de manera progresiva, con unos escalones de carga como los que se han fijado en este proyecto.

## 7 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

El objetivo inicial de este proyecto era conocer el comportamiento de la arena y el EPS mezclados en distintas proporciones a través del ensayo edométrico. Los módulos edométricos obtenidos para el último escalón de carga son:

-Muestra 0.2% EPS: 19835.7 kPa

-Muestra 1% EPS: 10473.88 kPa

Los resultados se compararon con los datos de módulos edométricos proporcionados por otros trabajos. De ello se concluye que el módulo depende de la cantidad de EPS que la muestra contenga, cuanto más EPS menor es el módulo edométrico. Así, en función del contenido en EPS, el rango de variación oscila entre 614,31 kPa (EPS 100%) y 24150 kPa (arena pura). Los datos obtenidos en este trabajo se encuentran dentro del mismo orden de magnitud que los obtenidos en otros trabajos para mezclas arena-EPS (4545.45 kPa y 2347.41 kPa). También se ha observado que el módulo edométrico no tiene un comportamiento lineal, las muestras se rigidizan conforme aumenta la tensión aplicada.

Se ha realizado una estimación de la deformación que sufriría un terreno preparado con mezcla de EPS-arena, al apoyar sobre el un terraplén de 5 m y un peso específico de 20 kN/ m<sup>3</sup>. Con una cantidad de EPS del 0,2% se obtiene una deformación del 7,6% y con una proporción del 1% de EPS se obtiene una deformación de 1,33%

Como objetivo secundario hubo que realizar otros ensayos para caracterizar el material. Para la arena se determinó:

- Densidad relativa de las partículas Gs: 2.78
- Densidad mínima: 1.525 kg/dm<sup>3</sup>
- Densidad máxima método 1: 1.708 kg/dm<sup>3</sup>
- Densidad máxima método 2: 1.77 kg/dm<sup>3</sup>

Y para el EPS se obtuvo una densidad de 23.44 kg/m<sup>3</sup>

Los resultados obtenidos son satisfactorios teniendo en cuenta las comparaciones realizadas.

## 8 REFERENCIAS

Chenari, R. J., Fard, M. K., Maghfirati, S. P., Pishgar, F., & Machado, S. L. (2016). An investigation on the geotechnical properties of sand–EPS mixture using large oedometer apparatus. *Construction and Building Materials*, 113, 773-782.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. *Mecánica de suelos*. Editorial Limusa, S.A, de C V. México, 2005. Traducido de la versión en inglés: *Soil Mechanics*. ISBN 968-18-1894-6.

BERRY, Peter L., REID, David. *Mecánica de suelos*. Editado por Martha Edna Suárez R. *McGraw Hill*: Santafé de Bogotá, 1993. Traducido de la primera edición en inglés de *An introduction to soil mechanics*. ISBN: 958-600-172-5.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis Ignacio. *Ingeniería geológica*. Mercedes Ferrer, Luis Ortuño, Carlos Oteo. Pearson Educación, Madrid, 2002. ISBN: 84-205-3104-9.

Asociación nacional de poliestireno expandido. ANAPE. Disponible en: <http://www.anape.es>. Fecha de consulta: 20 de septiembre 2019

MARIA ENCARNACION MARTINEZ MORENO, 2018. *Investigating material characteristics of EPS geof foam with different laboratory methods. (Trabajo final de máster)*. Universidad Politecnica de Cartagena, Cartagena,