

Criterio de rotura y parámetros resistentes de  
materiales EPS mediante el ensayo de corte.  
Aplicación en muros de contención y taludes.

Alumno: Jose Ángel Montalbán Valverde

Director: Iván Alhama Manteca





## Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mis padres, hermana, abuela y tíos por la ayuda que me han brindado a lo largo de este máster.

También agradecer a mi director de proyecto Iván Alhama, a Gonzalo García y a María Encarnación Martínez por la atención prestada.

Por último, agradecer a mi “escuadra” y especialmente a mi Capitán por conseguir que este barco llegue a buen puerto.





# Índice

1	Introducción .....	1
1.1	Resumen.....	1
1.2	Objetivos y alcance. ....	1
2	Fundamentos teóricos.....	2
2.1	Material EPS. ....	2
2.1.1	Características del material. ....	2
2.1.2	Ámbito de aplicación. ....	2
2.2	Teoría de la resistencia al corte. ....	8
2.2.1	Criterio de rotura. ....	8
2.3	El ensayo de corte directo .....	11
2.4	Aparatos usados en los ensayos de corte.....	14
2.4.1	La máquina de corte directo .....	14
2.4.2	Aparato Cyber-Plus evolution para registro de deformaciones y resistencia del terreno. 17	
3	Pruebas de laboratorio .....	18
3.1	Metodología de trabajo.....	18
3.1.1	Selección y preparación de las muestras. ....	18
3.1.2	Realización de los ensayos. ....	24
3.1.3	Criterio para escoger las cargas.....	31
3.2	Resultados de los ensayos de corte. ....	34
3.2.1	Ensayo EPS de densidad 20 kg / m <sup>3</sup> con un plano nítido. ....	34
3.2.2	Ensayo EPS de densidad 20 kg / m <sup>3</sup> con un plano irregular.....	39
3.2.3	Ensayo EPS de densidad 20 kg / m <sup>3</sup> granulado.....	44
3.2.4	Ensayo EPS de densidad 40 kg / m <sup>3</sup> con un plano nítido. ....	49
3.2.5	Ensayo EPS de densidad 40 kg / m <sup>3</sup> con un plano irregular.....	54
3.2.6	Ensayo EPS de densidad 40 kg / m <sup>3</sup> granulado.....	59
3.3	Discusión resultados de los ensayos de corte.....	64
4	Aplicaciones .....	65
4.1	Caso 1: Terraplén. ....	65
4.2	Caso 2: Embalse 1.....	69
4.3	Caso 3: Embalse 2.....	72
5	Conclusiones .....	77
6	Referencias .....	79





## 1 Introducción

### 1.1 Resumen.

En la actualidad el Poliestireno Expandido (EPS) es un material al que se le da un uso muy limitado en obra civil en España, aunque en el resto de Europa y el mundo si tiene un gran uso. Un ejemplo de ello es el uso que se le da al EPS en Noruega, donde se construyó en el año 1972 el puente Flom, el primer puente de EPS (Geir et al., 1972). Otro ejemplo sería la autovía E75 en Grecia. “First time application of expanded polystyrene in highway projects in Greece” (Georgios, P., & Elias S., 2011). En España casi todo el EPS utilizado en obra civil se destina a labores de aislamiento acústico o térmico, ya que es un muy buen aislante.

Este proyecto quiere dar otra perspectiva sobre el uso que se le puede dar al EPS, ya que además de aislante, también se extiende su uso a la construcción de diferentes tipos de obra civil; terraplenes, muros de contención, estribos, etc.

En este proyecto se analizará el uso del EPS tanto en la construcción de terraplenes como en la de embalses. Para ello se ha estudiado la resistencia al corte del EPS bajo diferentes condiciones, así como diferentes densidades, de manera que se pueda caracterizar su comportamiento frente a cortante según su densidad.

Para llevar a cabo este proyecto se ha usado tanto la máquina de corte directo como el aparato de registro electrónico Cyber-Plus evolution del laboratorio de geotecnia de la escuela de Caminos y Minas de la Universidad Politécnica de Cartagena, además del software para el cálculo de estabilidad de GeoSlope 2018.

### 1.2 Objetivos y alcance.

El objetivo principal del proyecto es caracterizar el material EPS, sus parámetros resistentes, mediante el ensayo de corte directo y utilizando las dos densidades de las que se dispone. De cada una de estas densidades se van a realizar tres tipos de ensayos; de plano nítido, de plano irregular y desgranado. Con los resultados se plantearán tres casos de estudio diferentes:

- Un primer caso en el que se estudiará el uso del EPS degradado como sustitutivo de una arena degradada en un terraplén, mediante el software GeoSlope 2018, para la obtención de su factor de seguridad.
- Un segundo y tercer caso en el que se estudiara la estabilidad frente a deslizamiento de dos tipologías de embalse, obteniendo el factor de seguridad correspondiente.

## 2 Fundamentos teóricos

### 2.1 Material EPS.

#### 2.1.1 Características del material.

- Material.

El poliestireno expandido (*EPS*) es un material plástico espumado, derivado del poliestireno.

- Densidades.

Los productos y artículos acabados en poliestireno expandido (*EPS*) se caracterizan por ser extraordinariamente ligeros, aunque 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>.

- Proceso de fabricación.

El Poliestireno Expandido (*EPS*) se obtiene a partir de la transformación del poliestireno expandible. Esta materia prima es un polímero del estireno que contiene un agente expansor, el pentano. Como todos los materiales plásticos el poliestireno expandible deriva en último término del petróleo, aunque hay que tener en cuenta que solo un 6% del petróleo se dedica a la fabricación de productos químicos y plásticos frente a un 94% dedicado a combustibles para transporte y calefacción.

A partir del procesado del gas natural y del petróleo se obtienen, mayoritariamente como subproductos, el etileno y diversos compuestos aromáticos. A partir de ellos se obtiene el estireno.

Este estireno monómero junto con el agente expansor sufre un proceso de polimerización en un reactor con agua dando lugar al poliestireno expandible, la materia prima de partida para la fabricación del poliestireno expandido.

#### 2.1.2 Ámbito de aplicación.

El poliestireno expandido (*EPS*) tiene dos ámbitos de aplicación fundamentales:

- Envase y embalaje.

El poliestireno expandido es un material que se utiliza ampliamente en el campo del envasado y embalado de una gran variedad de productos. Ello es debido principalmente a sus excelentes cualidades y propiedades entre las que destacan su alta capacidad de protección (absorción de impactos) y de aislamiento térmico, así

como su ligereza y facilidad de conformado que le permiten adaptarse a las necesidades de cada producto a proteger.



*Ilustración 2.1.2.1 EPS (aimsa.com / plaesa.es)*

- Construcción.

Dentro de la construcción podemos dividir su uso en dos categorías:

1. Aislante.



*Ilustración 2.1.2.2 EPS como aislante térmico/acústico (anape)*

2. Obra civil.

El poliestireno expandido (EPS) se viene utilizando desde hace décadas en aplicaciones de ingeniería civil tales como la construcción de infraestructuras terrestres (carreteras y líneas ferroviarias, pantallas acústicas, etc.), y marinas (diques y pantalanes).

Por su ligereza y resistencia mecánica, el EPS contribuye a reducir los asentamientos mejorando la estabilidad de terrenos con una baja capacidad portante mientras que, por su flotabilidad y durabilidad, es la solución idónea para la construcción de estructuras marinas portantes.

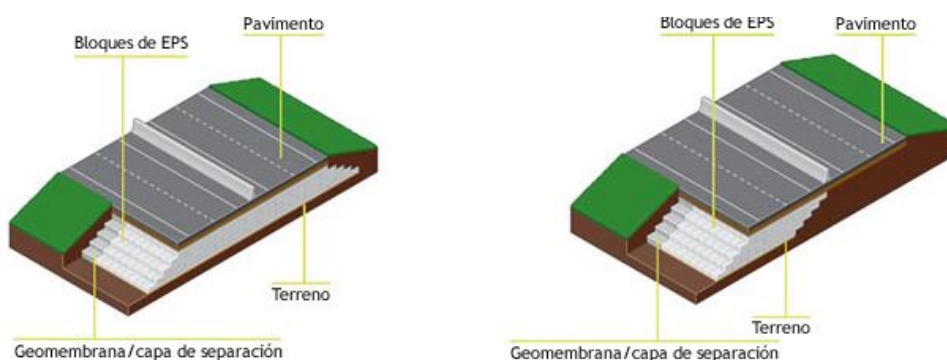
Aplicaciones del EPS en obra civil.

A partir de la información obtenida de la web de Anape (<http://www.anape.es>) las aplicaciones del EPS en obra civil son las siguientes:

- Construcción en carreteras.

En obra nueva, el EPS sustituye el uso de materiales de relleno pesados y la necesidad de su compactación, evitando el exceso de cargas sobre el terreno o las estructuras adyacentes.

En la ampliación de obras existentes, (por ejemplo, la ampliación de carriles), minimiza el impacto sobre la estructura y sus instalaciones. La elevada resistencia a la compresión del EPS permite soportar las cargas de tráfico sin ocasionar sobrecargas sobre el terreno inferior o los rellenos adyacentes.



*Ilustración 2.1.2.3 EPS en carreteras (anape)*

- Construcción de puentes.

Su uso en el relleno de pilares contribuye a soportar las sobrecargas de tráfico sin afectar al terreno, lo que implica menores movimientos diferenciales en la unión entre el puente y el pilar y reduciendo los costes de construcción del tablero y su mantenimiento a largo plazo.

Igualmente, en aquellos casos en que la estructura existente del puente no es capaz de soportar las cargas de tráfico, el EPS actúa trasladando estas cargas a la cimentación o al terreno.



Ilustración 2.1.2.4 EPS en puentes (anape)

- Construcción de estructuras del ferrocarril.

Por su resistencia mecánica, el EPS se utiliza también en la construcción de vías de ferrocarril para evitar sobrecargas en el terreno existente.

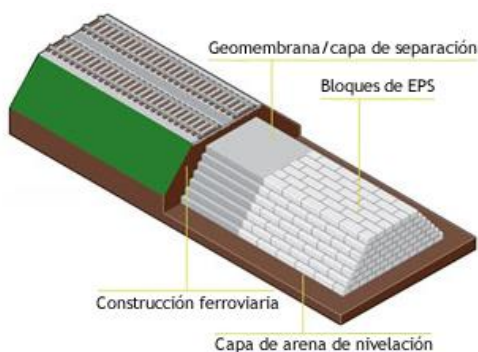


Ilustración 2.1.2.5 EPS en estructuras ferrocarril (anape)

- Reducción de cargas laterales del terreno.

Cuando se adosa a elementos verticales de contención, el EPS se configura como un relleno portante, reduciendo las cargas laterales sobre la estructura. Debido a que la presión horizontal que actúa sobre el muro de contención es proporcional al peso del relleno, se precisa una estructura de contención menos exigente si el relleno en la zona activa tras el muro se sustituye por EPS.

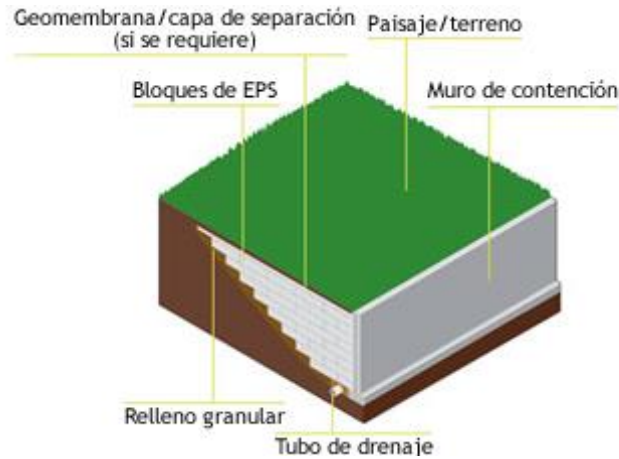


Ilustración 2.1.2.6 EPS en puentes (anape)

- Estabilización de taludes.

Reemplazando parte de los terrenos existentes por EPS, se consigue descargar la zona superior de los taludes de tierra mejorando su estabilidad.



Ilustración 2.1.2.7 EPS en estabilización de taludes (anape)

- Elevación para barreras de sonido.

EPS se utiliza para construir paredes exentas o elevaciones que actúan como barrera acústica en carreteras. También contribuye a reducir la transmisión de vibraciones del terreno transmitidas, por ejemplo, bajo las vías de ferrocarril o los pavimentos, como parte de la base de las estructuras adyacentes o como una pantalla elevada entre las vías férreas o aceras y las estructuras adyacentes.

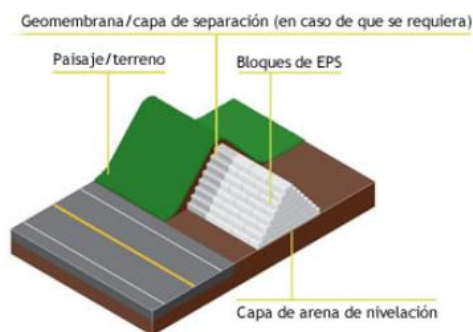


Ilustración 2.1.2.8 EPS en barreras de sonido (anape)

- Construcción de diques.

El EPS se puede instalar fácilmente y proporciona el volumen necesario para permitir que el dique regrese a su configuración original. Con aproximadamente el 1% del peso de los rellenos de tierra tradicionales, el uso de EPS como relleno reduce/elimina las cargas adicionales y los ciclos de asentamiento y elevación del dique.

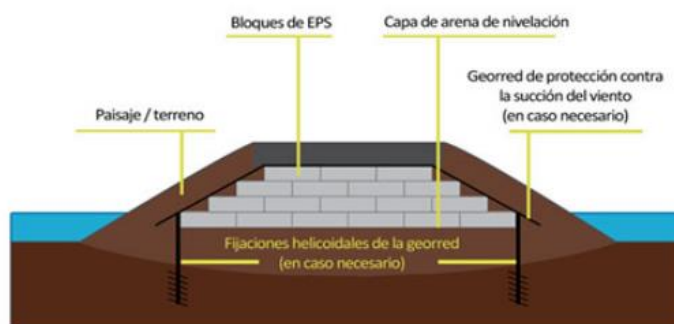


Ilustración 2.1.2.9 EPS en diques (anape)

- Estructuras flotantes.

Por su flotabilidad, resistencia al agua y durabilidad, el EPS se utiliza en la construcción de cimentaciones flotantes. Por un lado, soporta la estructura repartiendo las cargas en todos los puntos y, por otra, permite su desplazamiento con la variación del nivel de agua. Además, el cambio de la disposición de los pilotes es un trabajo sencillo y la ampliación de la estructura se puede hacer de manera fácil y rápida.

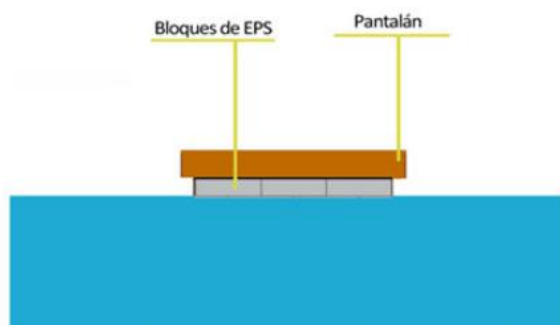


Ilustración 2.1.2.10 EPS en estructuras flotantes (anape)



## 2.2 Teoría de la resistencia al corte.

Al modificar el estado tensional del suelo se producen deformaciones que pueden originar su rotura. Aunque los suelos con cohesión rompen a veces por tracción, como puede ser el caso de las grietas verticales que a veces se observan en la coronación de un talud deslizado, la forma de rotura más habitual en los suelos es por esfuerzo cortante (tensión tangencial).

### 2.2.1 Criterio de rotura.

La resistencia al corte del suelo no puede considerarse como un parámetro único y constante, ya que depende de su naturaleza, estructura, enlaces, nivel de deformaciones, etc., así como, muy especialmente, de su estado tensional y de la presión del fluido que rellena sus poros (agua o agua y aire). El criterio de rotura en suelos más difundido deriva del propuesto por Coulomb, que relaciona tensiones efectivas normales y tensiones tangenciales actuando en cualquier plano del suelo. Este criterio establece que, para un suelo saturado, la resistencia al corte viene dada por la expresión:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u)\tan\phi'$$

Donde:

$\tau$  = resistencia al corte del terreno a favor de un determinado plano.

$\sigma_n$  = tensión total normal actuando sobre el mismo plano.

$u$  = presión intersticial.

$c'$  = cohesión efectiva.

$\phi'$  = ángulo de rozamiento interno efectivo.

$\sigma'$  = tensión efectiva.

La ecuación anterior representa una recta en el espacio  $(\sigma', \tau)$ , que a menudo se denomina línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura del suelo (Figura 2.2.1). Esta línea proporciona, para cada valor de la tensión efectiva normal a un plano que atraviesa un elemento del suelo, la máxima tensión tangencial movilizable a favor de dicho plano. De la (Figura 2.2.1) se pueden deducir algunos aspectos interesantes:



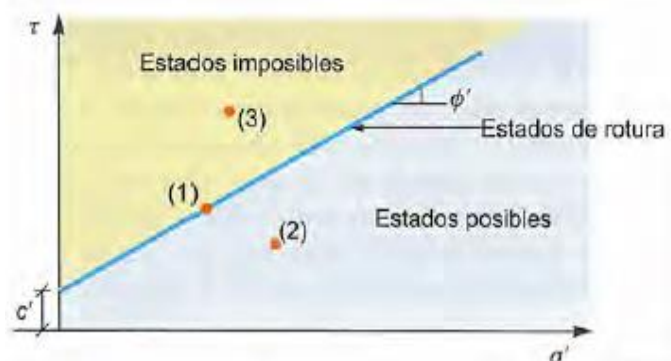


Figura 2.2.1 Criterio de rotura en suelo. González de Vallejo, L. (2002).

- La cohesión efectiva es la ordenada en el origen de la envolvente de rotura. Representa por lo tanto la máxima resistencia tangencial movilizable en un plano cualquiera cuando la tensión efectiva normal en dicho plano es nula.

- La máxima tensión tangencial movilizable en un plano es mayor a medida que aumenta la tensión efectiva normal que actúa sobre dicho plano. Es decir, el suelo es más resistente cuanto mayor es su nivel de tensiones efectivas.

- La línea de resistencia definida actúa como una «envolvente o superficie de estado», separando estados posibles de imposibles. Así:

- El punto (1) señalado en la Figura 2.2.1 representa un estado de rotura.
- El punto (2) representa una combinación ( $\sigma'$ ,  $\tau$ ) que cuenta con un cierto factor de seguridad ya que, para una determinada tensión efectiva normal, la tensión tangencial es inferior a la máxima movilizable.
- El punto (3) representa un estado imposible en tanto en cuanto se sitúa por encima de la envolvente de rotura, lo que significa que se ha sobrepasado la combinación máxima ( $\sigma'$ ,  $\tau$ ) del criterio de rotura, y por lo tanto no es compatible con la resistencia definida del suelo.

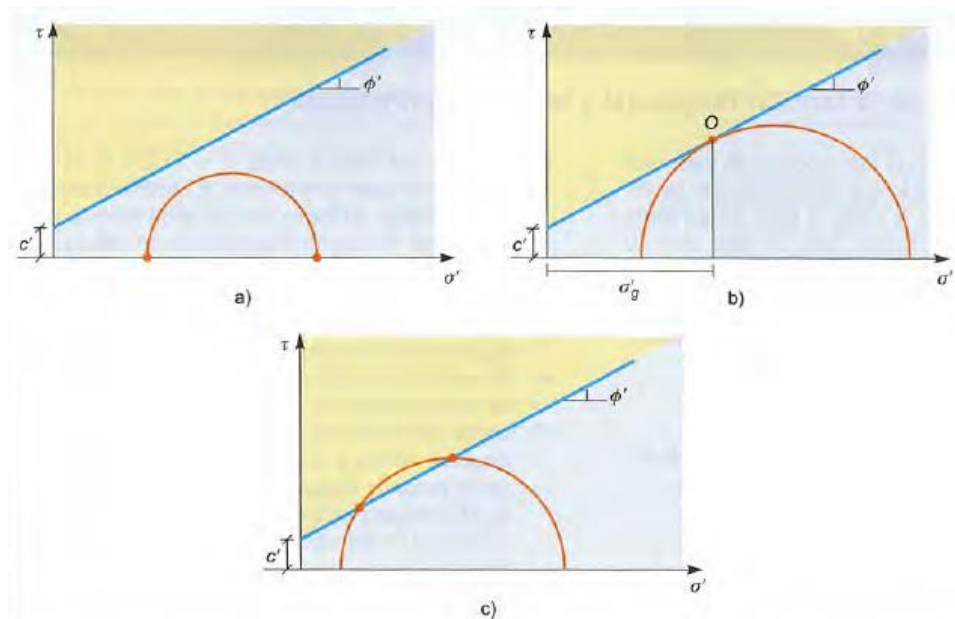


Figura 2.2.2 La envolvente de rotura y el círculo de Mohr. González de Vallejo, L. (2002).

Si se recuerdan los conceptos básicos del tensor de tensiones y el Círculo de Mohr, se pueden relacionar fácilmente las condiciones de rotura en un plano dado con las tensiones actuantes a favor de otros planos. En la (Figura 2.2.2) se han representado tres Círculos de Mohr en el espacio  $(\sigma', \tau)$ , que en principio representarían tres estados tensionales de un elemento de suelo. Si los parámetros de resistencia al corte del suelo  $(c', \phi')$  dan lugar a la línea de resistencia intrínseca dibujada, es inmediato observar que:

- El estado tensional representado por el círculo (A) cuenta con un margen de seguridad, ya que no llega a alcanzar a la envolvente de rotura del suelo. Es por tanto un estado posible y seguro (el suelo no ha roto).
- El estado tensional representado por el círculo (B) indica una situación de rotura. Así, el punto (O) representa la combinación  $(\sigma'_f, \tau_f)$  en un plano que atraviesa el elemento de suelo en el que se alcanzan las condiciones del criterio de rotura definido.
- El estado tensional representado por el círculo (C) es imposible, ya que existirían orientaciones de planos atravesando el elemento de suelo en los que se excederían las condiciones  $(\sigma', \tau)$  de rotura (todos los planos representados por puntos del círculo situados por encima de la línea de resistencia intrínseca).

Del análisis anterior se desprende que, cuando se alcanzan las condiciones de rotura en un elemento de suelo, el Círculo de Mohr que representa su estado tensional será tangente a la línea de resistencia intrínseca y que, además, el plano a favor del cual se alcanzan dichas condiciones de rotura será el representado por el punto de tangencia.

### 2.3 El ensayo de corte directo

El aparato de ensayo se representa esquemáticamente en la Figura 2.3.1 Se trata de una caja rígida de acero, usualmente de sección cuadrada, que se encuentra dividida en dos mitades y en cuyo interior se coloca la muestra de suelo. Encima de ésta se dispone una placa de reparto rígida sobre la que se puede aplicar una carga vertical ( $N$ ). Todo el conjunto se introduce en un recipiente de acero de mayores dimensiones, que puede llenarse de agua para realizar el ensayo en condiciones de saturación (en este último caso se pueden disponer también piedras porosas encima y debajo de la muestra para facilitar el drenaje). La inducción de tensiones cortantes en el suelo se logra trasladando horizontalmente la parte inferior de la caja de corte mientras que se impide totalmente el movimiento de la zona superior. Una prueba completa sobre un determinado suelo consiste en ensayar tres muestras idénticas del mismo material bajo tres cargas verticales distintas ( $N_1, N_2, N_3$ ) o, lo que es lo mismo, bajo tres tensiones normales diferentes (basta dividir cada carga ( $N$ ) por la sección ( $S_0$ ) de la muestra para obtener la tensión normal actuante). En cada uno de los ensayos individuales, a medida que se obliga a la parte inferior de la caja a desplazarse en horizontal a velocidad constante, se va midiendo:

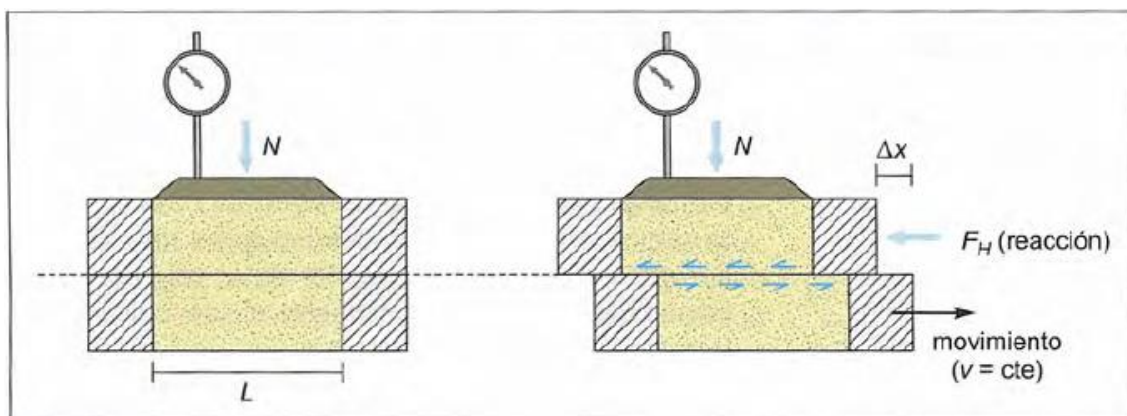


Figura 2.3.1 Esquema del aparato de corte directo. González de Vallejo, L. (2002).

- La fuerza ( $F_H$ ) necesaria para impedir el movimiento de la parte superior. Dividiendo dicha fuerza por la sección ( $S_0$ ) de la muestra se obtiene la tensión tangencial ( $\tau$ ) actuante en cada momento sobre el plano de corte.
- El desplazamiento vertical de la muestra. Teniendo en cuenta que las paredes de la caja de corte son rígidas, como en el edómetro, la deformación vertical medida ( $\delta\varepsilon_v$ ) proporciona directamente el cambio de volumen de la muestra ( $\delta v$ ), ya que:

$$\delta\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta H \cdot S_0}{H_0 \cdot S_0} = \frac{\Delta V}{V_0} = \delta v$$

donde:

$H_0$  es la altura inicial de la muestra (4,2 cm en las cajas de corte habituales).

$S_0$  es la sección de la muestra (usualmente 36 cm<sup>2</sup> para cajas de L = 6 cm de lado).

$V_0 = H_0 \cdot S_0$  es el volumen inicial de suelo.

$\Delta H$  es el desplazamiento vertical (positivo si es un acortamiento).

$\Delta V$  es la variación de volumen de suelo (positivo si es una compresión).

Con respecto a las fases de ensayo, el proceso suele ser el siguiente:

- a) Se aplica una tensión total vertical  $N_1$ .
- b) Si el ensayo se realiza con la muestra saturada y la célula inundada, habitualmente se deja consolidar la muestra hasta que se disipen los excesos de presión intersticial generados. Esta fase es similar a un escalón del ensayo edométrico, de manera que se puede dibujar la curva asiento tiempo y comprobar cuándo finaliza la consolidación, momento en el que se puede suponer que la tensión total aplicada se ha transformado íntegramente en tensión efectiva.
- c) Se imprime a la parte inferior de la caja de corte una velocidad horizontal constante y se mide a intervalos de tiempo determinados la reacción (FHI)

necesaria para impedir el desplazamiento de la superior, de manera que la tensión tangencial en cada instante resulta ser:

$$\tau = \frac{F_{H1}}{L^2}$$

Nota: En esta fase, si la velocidad de corte es suficientemente pequeña como para permitir la disipación de los excesos de presión intersticial generados por las tensiones tangenciales aplicadas, el ensayo puede considerarse drenado. En estas condiciones los resultados vendrán expresados directamente en tensiones efectivas ( $\sigma_1 = \sigma'_n$ ) Para ello, dado que en el aparato de corte directo no se puede controlar el drenaje ni medir la presión intersticial en cada instante, es importante seleccionar una velocidad suficientemente pequeña, algo que depende naturalmente del tipo y permeabilidad del suelo ensayado.

- d) En los mismos intervalos de tiempo se mide el desplazamiento vertical de la muestra, lo que permite obtener los cambios de volumen del suelo en cada momento.

Este mismo proceso se vuelve a realizar con otras dos muestras idénticas de suelo, pero sometidas a tensiones normales crecientes, ( $\sigma_{n2}$ ) y ( $\sigma_{n3}$ ).

Con relación a la movilización de resistencia al corte, en la Figura 2.3.2 se muestran cualitativamente los resultados de un ensayo drenado completo como el descrito. En abscisas se representa el desplazamiento horizontal ( $\Delta x$ ) de la parte inferior de la caja de corte y en ordenadas la tensión tangencial ( $\tau$ ) medida para cada valor de dicho desplazamiento. En la Figura 2.3.2 se pueden observar los siguientes aspectos de interés:

- Sea cual sea la tensión efectiva normal aplicada, la tensión tangencial movilizada aumenta progresivamente a medida que progresa el desplazamiento de la caja de corte hasta que se alcanza un máximo ( $\tau$ ).
- Cuanto mayor es la tensión efectiva normal inicial, mayor es la tensión tangencial máxima alcanzada. La pendiente inicial de la curva tensión tangencial-desplazamiento horizontal es más pronunciada cuanto mayor es la tensión efectiva normal inicial, lo que indica que el suelo aumenta la rigidez con el nivel de tensiones.

En la Figura 2.3.2 se muestran las tensiones tangenciales máximas de las curvas anteriores junto con las tensiones efectivas normales iniciales. Como puede apreciarse, los puntos representativos ( $\sigma'_n, \tau_f$ ) de los tres ensayos se pueden unir de forma bastante aproximada con una recta, que sería la línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura de la que se pueden fácilmente obtener los parámetros ( $c', \phi'$ ).

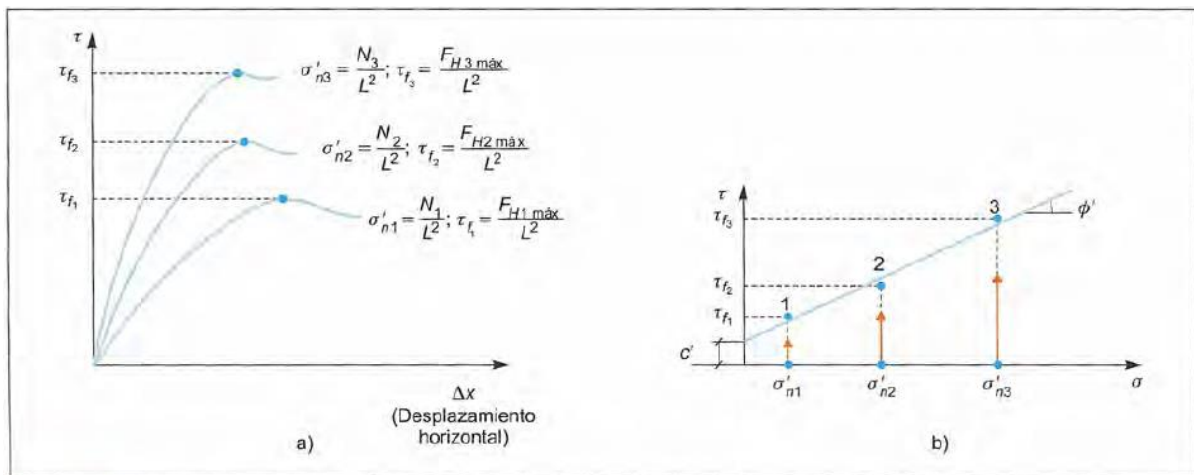


Figura 2.3.2 Obtención de la envolvente de rotura de los parámetros de resistencia al corte a partir de un ensayo de corte directo drenado. González de Vallejo, L. (2002).

## 2.4 Aparatos usados en los ensayos de corte

### 2.4.1 La máquina de corte directo

La máquina está formada por:

- Un motor controlado por un circuito electrónico, que permite obtener velocidades desde 0,00001 hasta 1,99999 mm/min, dispone de un volante de accionamiento manual para posicionar adecuadamente el carro deslizante o para trabajar con accionamiento manual.
- Cuadro de maniobra formado por un pulsador de marcha, otro de paro y dos pulsadores para elegir el sentido de la marcha.





Imagen 2.4.1.1 Cuadro de maniobra aparato de corte directo

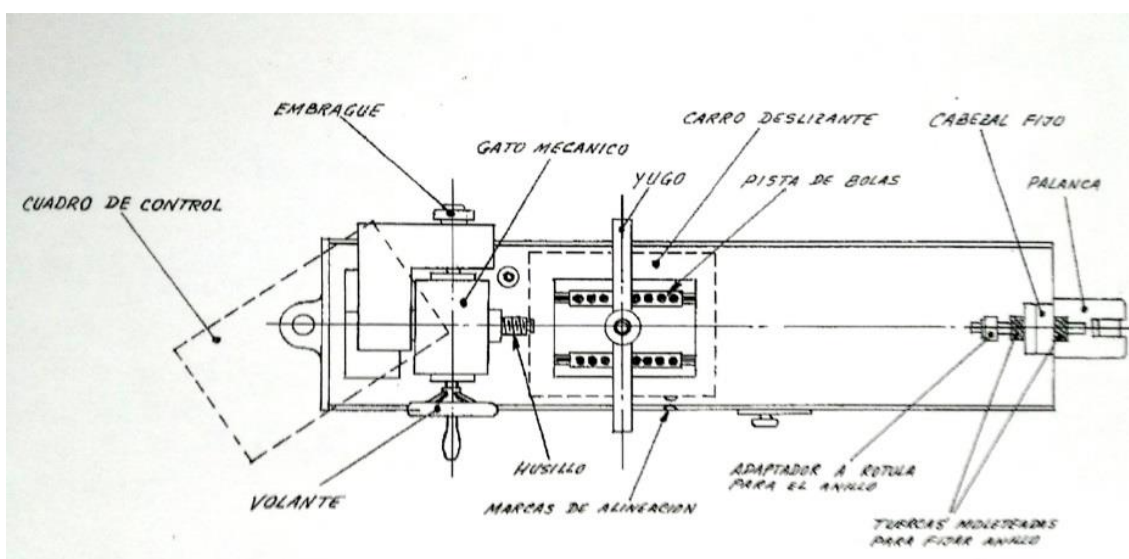
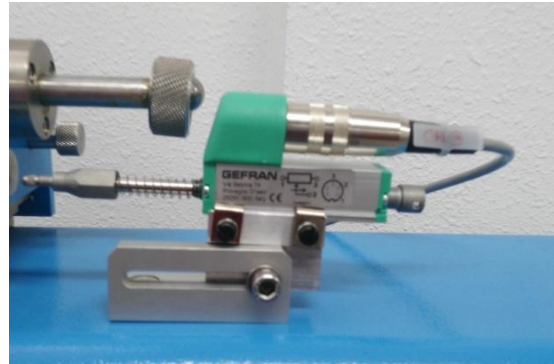


Imagen 2.4.1.2 Croquis aparato de corte directo

- Transductor de fuerza de 5kN, a tracción / compresión, con error de linealidad menor que 0,1%, que sustituye al anillo dinamométrico.
- Dos transductores de deformación de 25mm y 10mm, que sustituyen a los comparadores de consolidación y de deformación.



*Imagen 2.4.1.3 transductor vertical*



*Imagen 2.4.1.4 transductor horizontal*

- 1 carro deslizante para contener las células de corte de 60 x 60 mm, incluyendo un pistón repartidor de cargas verticales, cuatro parrillas, una placa base, dos placas porosas, dos tornillos con cabeza moleteada para fijar las dos mitades de la célula de corte y dos tornillos para separar las dos mitades de la célula.
- 1 célula de corte completa de 60 x 60 mm.
- Juego de pesas.
- Accesorios para remoldear muestras alteradas en célula de 60x60 mm.
- Accesorios para fabricar probetas remoldeadas en corte directo.
- Palanca con relación 10:1.



*Imagen 2.4.1.5 Aparato de corte directo*



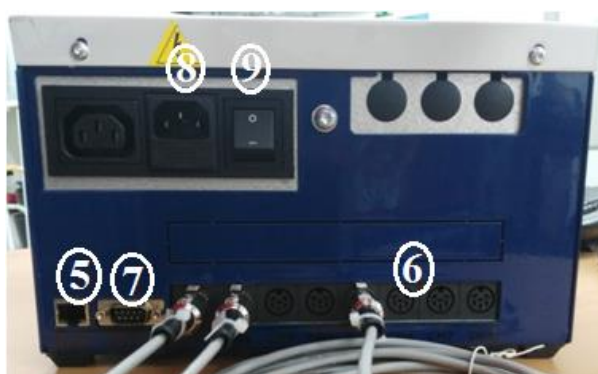
2.4.2 Aparato Cyber-Plus evolution para registro de deformaciones y resistencia del terreno.

La función del Cyber-Plus evolution es registrar y recopilar los datos que se obtienen del ensayo de corte directo. El aparato Cyber-Plus evolution consta de las siguientes partes:

- a) Teclado (Imagen 2.4.2.1).
- b) Pantalla táctil (Imagen 2.4.2.1).
- c) Puerto tarjeta SD (Imagen 2.4.2.2).
- d) Puerto USB (lateral aparato).
- e) Entrada web (lateral aparato).
- f) 8 entradas para canales (Imagen 2.4.2.2).
- g) Entrada para conectar monitores (Imagen 2.4.2.2).
- h) Entrada de corriente (Imagen 2.4.2.2).
- i) Interruptor de encendido (Imagen 2.4.2.2).



*Imagen 2.4.2.1 Aparato Cyber-Plus evolution*



*Imagen 2.4.2.2 Aparato Cyber-Plus evolution*

### 3 Pruebas de laboratorio

#### 3.1 Metodología de trabajo.

Para la realización de las pruebas de laboratorio se ha seguido la metodología que se explica a continuación.

##### 3.1.1 Selección y preparación de las muestras.

Los pasos a seguir para la preparación de las muestras necesarias son los siguientes:

- a) El laboratorio de Geotecnia de la Escuela de Caminos y Minas de la UPCT cuenta con dos bloques de material EPS, uno con densidad de 20kg/m<sup>3</sup> (Imagen 3.1) y otro con densidad de 40kg/m<sup>3</sup>(Imagen 3.2).

Primero se comprobará la densidad de ambos bloques. Para ello se obtienen muestras de cada bloque y conociendo el volumen de la muestra y su peso se hallará su densidad.



*Imagen 3.1 Bloque EPS densidad 20kg/m<sup>3</sup>*



*Imagen 3.1 Bloque EPS densidad 40kg/m<sup>3</sup>*

- b) Una vez obtenidas las densidades mencionadas en el apartado anterior y corroborando que los bloques de EPS tienen una densidad de 20kg/m<sup>3</sup> y 40kg/m<sup>3</sup>, se empezaran los ensayos.
- c) El primer paso será elegir el número de muestras necesarias. En este caso se usarán 24 muestras repartidas de la siguiente manera:
  - a. Cuatro muestras de densidad 20kg/m<sup>3</sup> con un corte limpio.
  - b. Cuatro muestras de densidad 20kg/m<sup>3</sup> con un corte irregular.
  - c. Cuatro muestras de densidad 20kg/m<sup>3</sup> desgranadas.

- d. Cuatro muestras de densidad 40kg/m<sup>3</sup> con un corte limpio.
- e. Cuatro muestras de densidad 40kg/m<sup>3</sup> con un corte irregular.
- f. Cuatro muestras de densidad 40kg/m<sup>3</sup> desgranadas.

d) Teniendo ya claro el número de muestras que necesito y dependiendo de la forma que tenga que darle a cada una de ellas se seguirá un procedimiento u otro.

### 3.1.1.1 Muestras de corte limpio.

Ayudándome de las herramientas de las que dispone el laboratorio, pasare a darles forma siguiendo los siguientes pasos:

- a) Cortar muestras de dimensiones 60x60x45 mm de los bloques de EPS disponibles en el laboratorio, para esto será necesario:
  - i. Sierra manual (Imagen 3.3).
  - ii. Sierra de calar (Imagen 3.3).



*Imagen 3.3 material laboratorio*

- b) Una vez obtenidos las muestras con unas dimensiones muy cercanas a las indicadas anteriormente, pasaré a utilizar una lija (Imagen 3.3) para darle la forma exacta necesaria para poder introducir las muestras en la célula de corte.

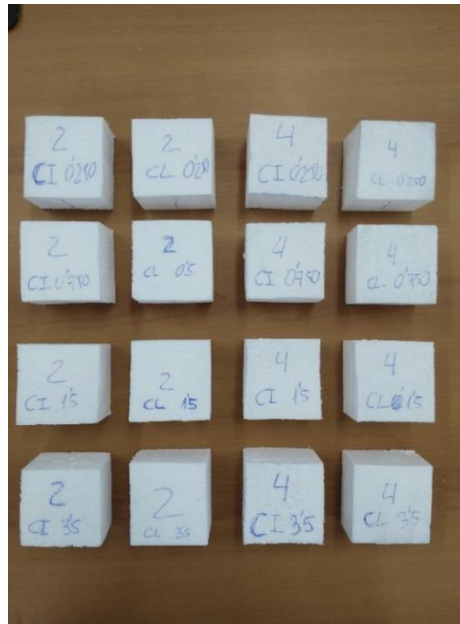


Imagen 3.4 muestras

- c) Teniendo ya nuestras muestras con las dimensiones necesarias (Imagen 3.4) se pasará a realizar un corte en el plano horizontal de las mismas. Lo primero que habrá que tener en cuenta al realizar este corte es que las muestras se desplazan verticalmente nada más ponerle el peso, por lo que si se cortan las muestras antes de saber cuál es ese desplazamiento vertical se estaría cometiendo un fallo, ya que sino la línea de corte no coincidirá con la de la célula de corte. Este paso es fundamental sobre todo para las muestras de EPS con densidad de 20kg/m<sup>3</sup> y para las muestras a las que se les pone un mayor peso, ya que pueden darse variaciones de milímetros como se ha observado en los ensayos.
- d) Una vez que sabemos lo que varían las muestras en el plano vertical pasaremos a hacer el corte en la muestra (Imagen 3.5).

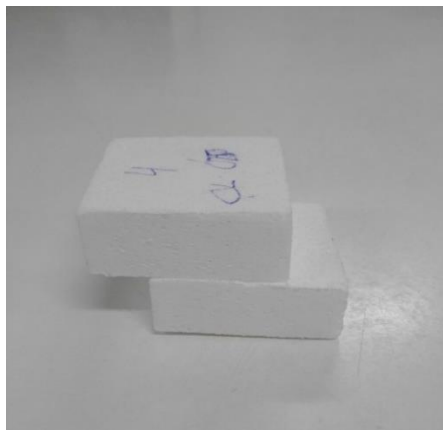
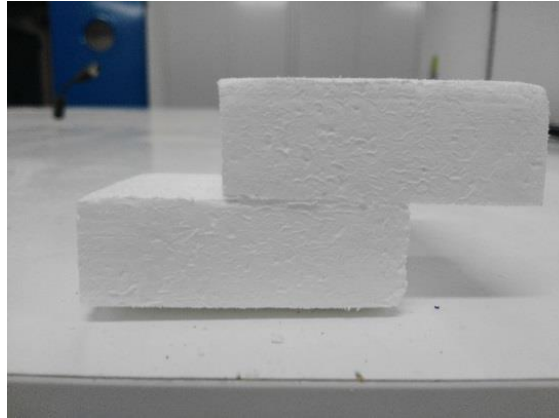


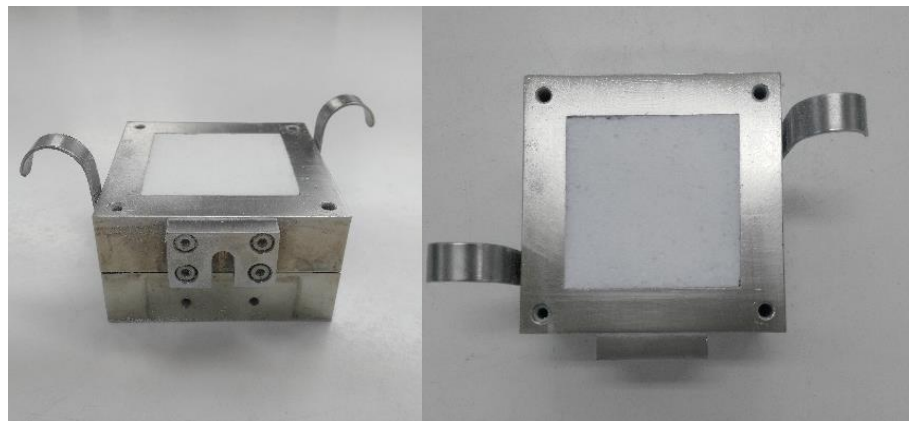
Imagen 3.5 muestra plano nítido

- e) Cuando ya tenemos la muestra cortada con un plano de corte horizontal limpio (Imagen 3.6), para ello utilizaremos la lija, procedo a introducirla en la máquina de corte directo y comenzar mi ensayo.



*Imagen 3.6 muestra plano nítido lijada*

- f) Antes de introducirla en la máquina de corte directo habrá que introducir la muestra en la célula de corte. Es muy importante que la muestra respete las dimensiones de la célula, como se muestra en la (Imagen 3.7), para que no pueda moverse y así dar fallos en la prueba.



*Imagen 3.7 muestra en la célula de corte*

En este caso se harán cuatro ensayos con las muestras del material EPS con densidad (40kg/m<sup>3</sup>) y cuatro con las muestras del material EPS con densidad (20kg/m<sup>3</sup>). A cada uno de estos ensayos por densidades se les asignará un peso distinto que será de:

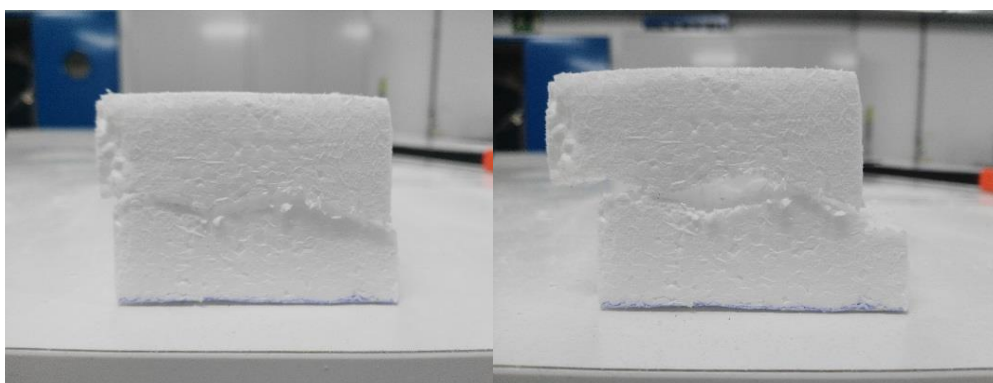
- 0.250 kg.

- 0.750kg.
- 1.5kg.
- 3.5kg.

### 3.1.1.2 Muestras de corte irregular.

Para los ensayos de corte irregular se seguirá la misma metodología que se ha usado en los ensayos con muestras de corte limpio.

La única diferencia será que en vez de hacer un corte limpio en el plano horizontal de la muestra se hará un corte irregular en forma de sierra como se puede observar (Imagen 3.8).



*Imagen 3.8 muestra con plano de corte irregular*

Terminado los ensayos de corte irregular pasaría a hacer los últimos ensayos con el material EPS, serían los ensayos con el EPS desgranado lo máximo posible.

### 3.1.1.3 Muestras desgranadas.

Para crear las muestras desgranadas habrá que seguir el siguiente procedimiento:

- Calcular los gramos de material que necesito para poder tener las densidades necesarias dentro de la célula de corte, para ello se necesitará saber, el volumen que tiene la célula de corte ( $60 \times 60 \times 45 \text{ mm} = 0.000162 \text{ m}^3$ ), y las densidades de los bloques de material (20 y 40  $\text{kg/m}^3$ ).

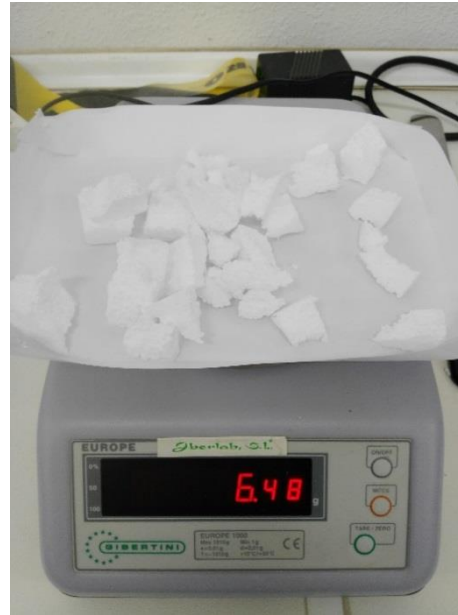
- b) Una vez obtenidos estos datos y haciendo las siguientes operaciones obtendremos los gramos de material que necesitamos para nuestros ensayos.

$$(0.000162\text{m}^3 * 20 \text{ kg/m}^3) / 1\text{m}^3 = 0.00324 \text{ kg} \rightarrow 3.24 \text{ g.}$$

$$(0.000162\text{m}^3 * 40 \text{ kg/m}^3) / 1\text{m}^3 = 0.00648 \text{ kg} \rightarrow 6.48 \text{ g.}$$



*Imagen 3.9 Gramos EPS (20 kg/m3)*



*Imagen 3.10 Gramos EPS (40 kg/m3)*

- c) Teniendo los gramos de material necesario y a gracias a las basculas del laboratorio (Imagen 3.9) (Imagen 3.10) pasaremos a rellenar la célula de corte con el material de una manera precisa (Imagen 3.11).

Es muy importante ir compactando poco a poco el EPS granulado para que puede entrar toda la cantidad necesaria en la célula de corte y de esta manera que se dé la densidad deseada (Imagen 3.12).





Imagen 3.11 EPS desgranado



Imagen 3.12 EPS desgranado y compactado

### 3.1.2 Realización de los ensayos.

Para la realización de los ensayos en el aparato de corte directamente previamente hemos tenido que preparar las muestras como se explica en el apartado anterior. Una vez tenemos nuestras muestras como se puede observar en la (Imagen 3.13) deberemos seguir los siguientes pasos:

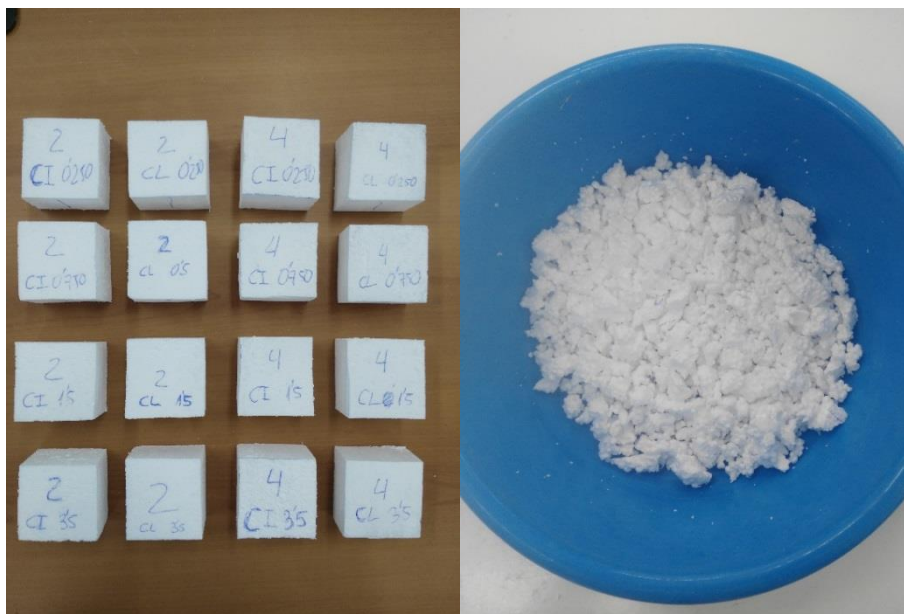


Imagen 3.13 muestras



1. Colocamos la célula en el carro deslizante (Imagen 3.14), tenemos que ajustar la posición de esta a través de las tuercas que se sitúan en el extremo del carro deslizante hasta que esté bien sujeta. Es muy importante que el carro deslizante esté alineado con la parte inferior del aparato de corte directo, para ello usaremos el volante. Dicho volante tiene un embrague que deberemos desactivar para poder girarlo.



*Imagen 2.14*

2. Ajustamos la muestra en el carro deslizante (Imagen 3.16), esto lo hacemos a través de los tornillos laterales que tiene el carro deslizante. Posteriormente colocamos el yugo de carga sobre el pistón repartidor de las cargas de la célula de corte y ajustamos los transductores para que se queden apoyados, en el carro deslizante el horizontal y en el yugo el vertical.



*Imagen 3.15 Muestra en célula de corte*



*Imagen 3.16 Muestra en carro deslizante*

- Colocamos el peso deseado para la realización del ensayo, para ello colocaremos las pesas en el soporte (Imagen 3.17). Antes de esto, se levanta el apoyo de la palanca para bloquearla de forma que no puedan aplicarse carga sobre la muestra. Justo antes de comenzar el ensayo tendremos que desbloquearlo para poder realizar bien el ensayo.



Imagen 3.17

- Una vez realizados los pasos anteriores nos iremos al cuadro de maniobra y seleccionando el modo manual elegiremos pulsando el botón de las flechas la dirección que queremos darle al ensayo. Para que el aparato empiece a funcionar accionaremos el botón de “MARCHA”, si en algún momento queremos para el ensayo presionaremos el botón de “PARO”. Si queremos elegir la velocidad tendremos que cambiarla manualmente en el cuadro de maniobra moviendo las tuercas que hay alrededor de los números. En el caso de los ensayos que voy a realizar usaré una velocidad de 0.875 mm/min, he escogido esta velocidad basándome en la norma UNE 103401 “Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo”.

Ya que no hay ninguna referencia a la velocidad que hay que usar para muestras de EPS, se usará la misma que se usa para arenas según la norma UNE 103401,  $V=0.875\text{mm/min}$ .

Nota: antes de pulsar el botón “MARCHA” asegurarse de que los tornillos que sujetan las dos mitades de la caja de corte están quitados.

Una vez tenemos todo lo correspondiente al aparato de corte preparado tenemos que configurar el Cyber-Plus evolution para que pueda recibir las medidas del ensayo.



5. Encendemos Cyber-Plus evolution y una vez que estamos en el menú principal seleccionamos “Registro de datos” (Imagen 3.18), al seleccionarlo nos aparecerá una pantalla con unos valores (Imagen 3.19), estos valores son las mediciones que proporcionan los transductores.



Imagen 3.18



Imagen 3.19

6. Pulsando en el icono  entraremos en el submenú para programar el registro de datos (Imagen 3.20). En este submenú pondremos la descripción de nuestro ensayo, el dispositivo de almacenamiento Si pulsamos  aparecerá la siguiente pantalla (Imagen 3.21).

7. En esta imagen tenemos que elegir entre varias opciones para nuestros canales (Imagen 3.22):

- Archivo: Cyber plus recogerá los datos de los transductores.
- Gráfica: mostrará la gráfica de los datos de los transductores.
- Ambos: recopilara los datos de los transductores y muestra las gráficas.



*Imagen 3.20*



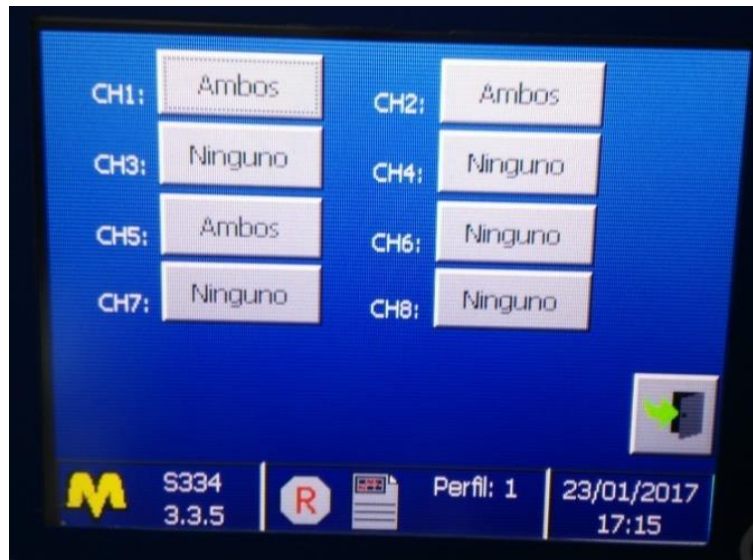


Imagen 3.21

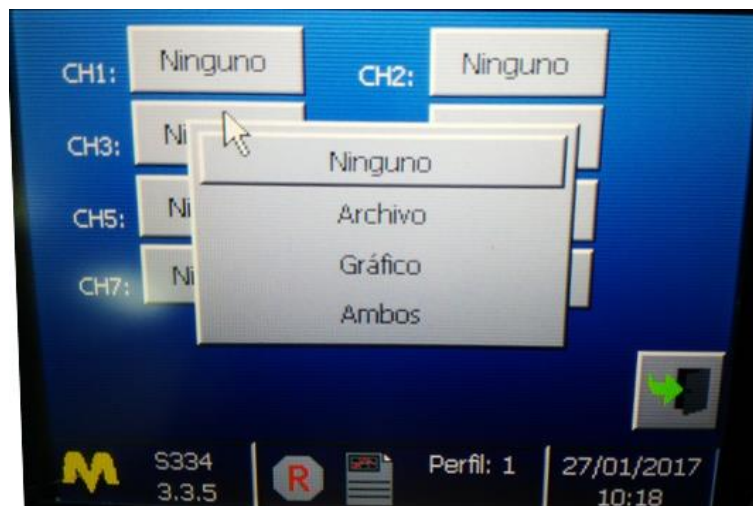


Imagen 3.22




8. Hecho esto y volviendo a la pantalla anterior (Imagen 3.20), pulsando , entraremos en otro submenú (Imagen 3.23) en el cual nos da la opción de elegir como queremos que sean nuestros datos y el tiempo en el que queremos que Cyber plus lo recoja.



Imagen 3.23

9. Una vez hecho todo esto y pulsando  daremos comienzo a nuestro ensayo de corte directo.

Nota: para comenzar el ensayo de corte directo se debe pulsar  y “MARCHA” simultáneamente.



10. Comenzado el ensayo y pulsando  nos aparecerá la gráfica de los datos que los transductores y el dinamómetro están recogiendo (Imagen <sup>2</sup> 24), para poder desplazarnos entre las diferentes graficas pulsaremos. 



Imagen 3.24

11. Si queremos para en algún momento el ensayo solo tendremos que darle a “STOP”.

### 3.1.3 Criterio para escoger las cargas.

Para la elección de las cargas usadas en los ensayos de corte directo me he basado en los casos que voy a explicar a continuación:

- Caso 1: Muro de contención.

En este caso analizaré un muro de contención con una altura de 6 metros que soporta el peso de una arena, para ello veremos la tensión que soporta el EPS a 1 m y 5 m de profundidad.

Datos:

- densidad de la arena = 1800kg/m<sup>3</sup>.
- profundidad 1 = 1 metro.
- profundidad 2 = 5 metros.

Cálculos:

- Profundidad de 1 metro.

$$1 \text{ m} \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 1800 \text{ kg/m}^2$$

$$1800 \text{ kg/m}^3 \times g = 18000 \rightarrow 18 \text{ kn/m}^2$$

$$\frac{0.0036 \text{ m}^2 \times 1.8 \text{ ton}}{1 \text{ m}^2} = 0.00648 \text{ ton} \rightarrow 6.48 \text{ kg}.$$

- Profundidad de 5 metros.

$$5 \text{ m} \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 9000 \text{ kg/m}^2$$

$$9000 \text{ kg/m}^3 \times g = 90000 \text{ kn/m}^2 \rightarrow 90 \text{ kn/m}^2$$

$$\frac{0.0036 \text{ m}^2 \times 9 \text{ ton}}{1 \text{ m}^2} = 0.0324 \text{ ton} \rightarrow 32.4 \text{ kg}.$$

- Caso 2: embalse.

En este segundo caso analizaré un pantano con una altura de 5 metros que soporta el peso del agua, para ello veremos la tensión que soporta el EPS a 1 m y 4 m de profundidad.

Datos:

- densidad del agua = 1000kg/m<sup>3</sup>.
- profundidad 1 = 1 metro.
- profundidad 2 = 4 metros.

Cálculos:

- Profundidad de 1 metro.

$$1 \text{ m} \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 1000 \text{ kg/m}^2$$

$$1000 \text{ kg/m}^3 \times g = 10000 \rightarrow 10 \text{ kn/m}^2$$

$$\frac{0.0036 \text{ m}^2 \times 1 \text{ ton}}{1 \text{ m}^2} = 0.0036 \text{ ton} \rightarrow 3.6 \text{ kg.}$$

- Profundidad de 4 metros.

$$4 \text{ m} \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 4000 \text{ kg/m}^2$$

$$4000 \text{ kg/m}^3 \times g = 40000 \rightarrow 40 \text{ kn/m}^2$$

$$\frac{0.0036 \text{ m}^2 \times 4 \text{ ton}}{1 \text{ m}^2} = 0.0144 \text{ ton} \rightarrow 14.4 \text{ kg.}$$

- Caso 3: Puente.

En este último caso se analizará la tensión que resiste el EPS debido a un puente con unas dimensiones determinadas.

Datos:

- Peso específico hormigón = 25 kn /m<sup>3</sup>.
- Sobrecarga uniforme = 4 kn/m<sup>2</sup>.
- Longitud puente = 18.75 m.
- Ancho del puente = 10 m.
- Canto del puente 0.4 m.



Cálculos:

$$\text{Combinación de acciones} \rightarrow 25 \text{ kn/m}^3 \times 4 \text{ m} + 1.5 \times 4 \text{ kn/m}^2 = 16 \text{ kn/m}^2$$

$$16 \times 10 \times 18.75 = 3000 \text{ kn}$$

$$3000 \div 2 = 1500 \text{ kn}$$

$$\frac{1500 \text{ kn}}{10 \text{ m} \times 2 \text{ m}} = 75 \text{ kn/m}^2$$

$$\frac{0.0036 \text{ m}^2 \times 7.5 \text{ ton}}{1 \text{ m}^2} = 0.027 \text{ ton} \rightarrow 27 \text{ kg.}$$

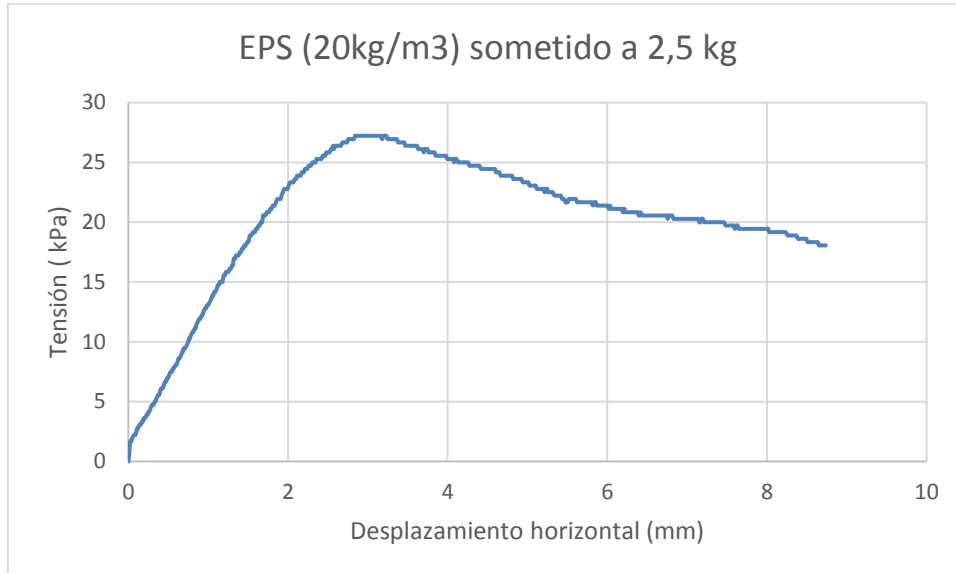
Una vez obtenidos todos los pesos que soporta 0.0036m<sup>2</sup> de EPS (volumen de la célula de corte) se procede a elegir los pesos a utilizar en los ensayos de acuerdo con los obtenidos en este apartado, eligiendo cuatro pesos finales de:

- 0.250 kg.
- 0.750kg.
- 1.5kg.
- 3.5kg.

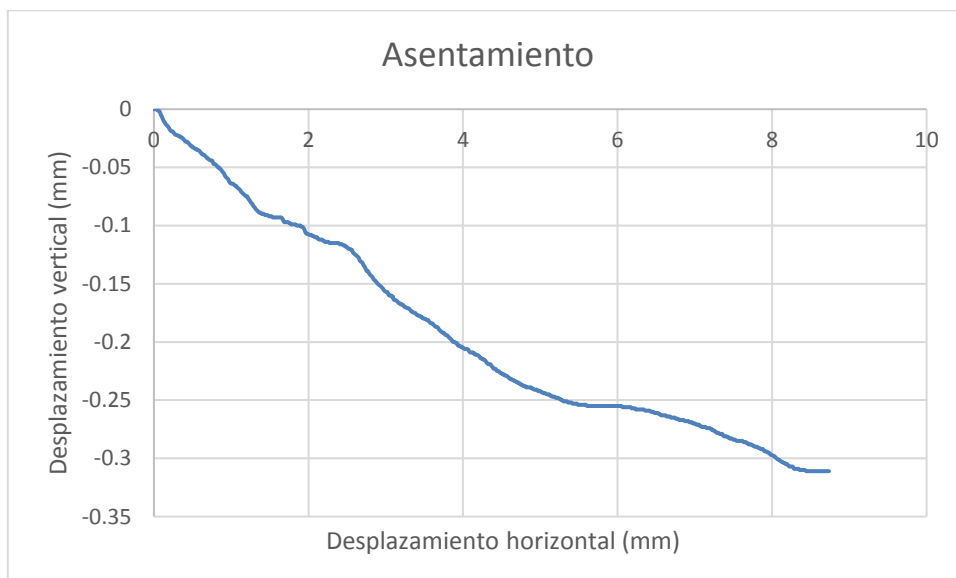
### 3.2 Resultados de los ensayos de corte.

#### 3.2.1 Ensayo EPS de densidad $20 \text{ kg/m}^3$ con un plano nítido.

- EPS sometido a 2.5 kg en la máquina de corte directo.

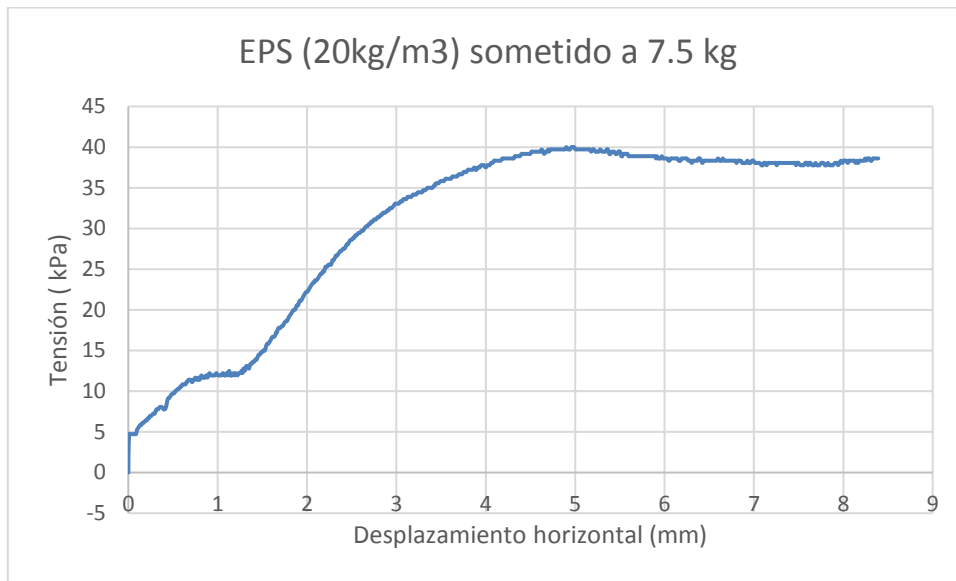


Gráfica 3.2.1 Ensayo EPS densidad  $20 \text{ kg/m}^3$  plano nítido

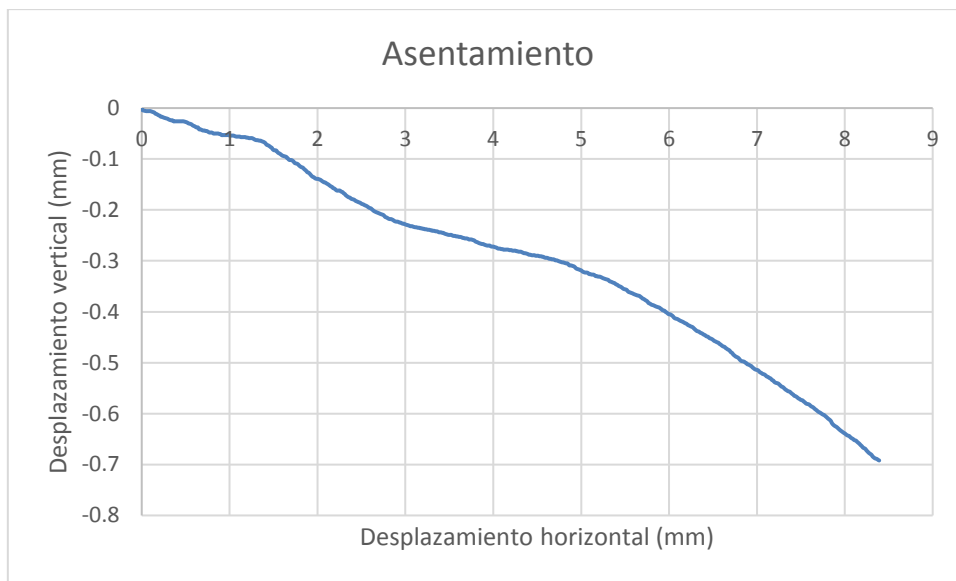


Gráfica 3.2.2 Ensayo EPS densidad  $20 \text{ kg/m}^3$  plano nítido

➤ EPS sometido a 7.5 kg en la máquina de corte directo.

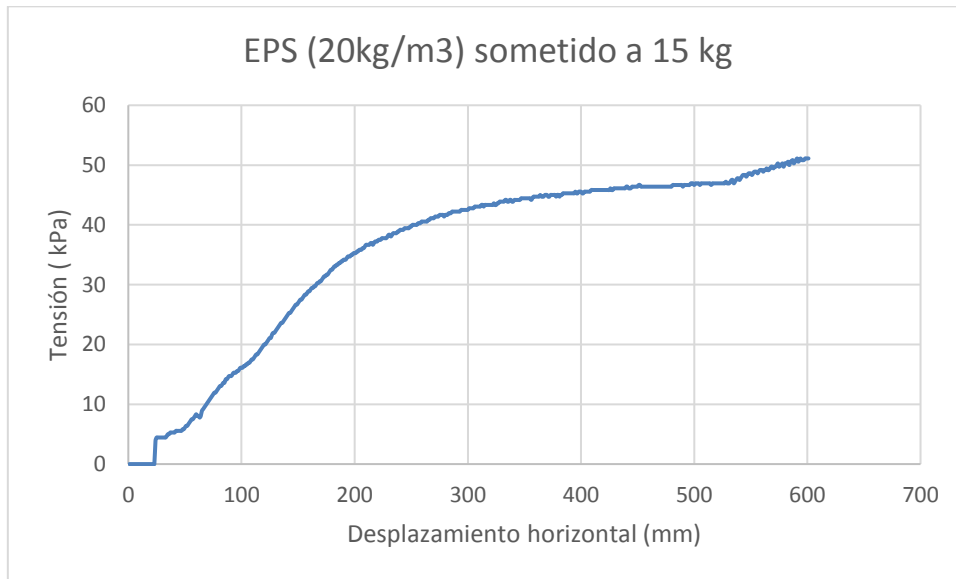


Gráfica 3.2.3 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

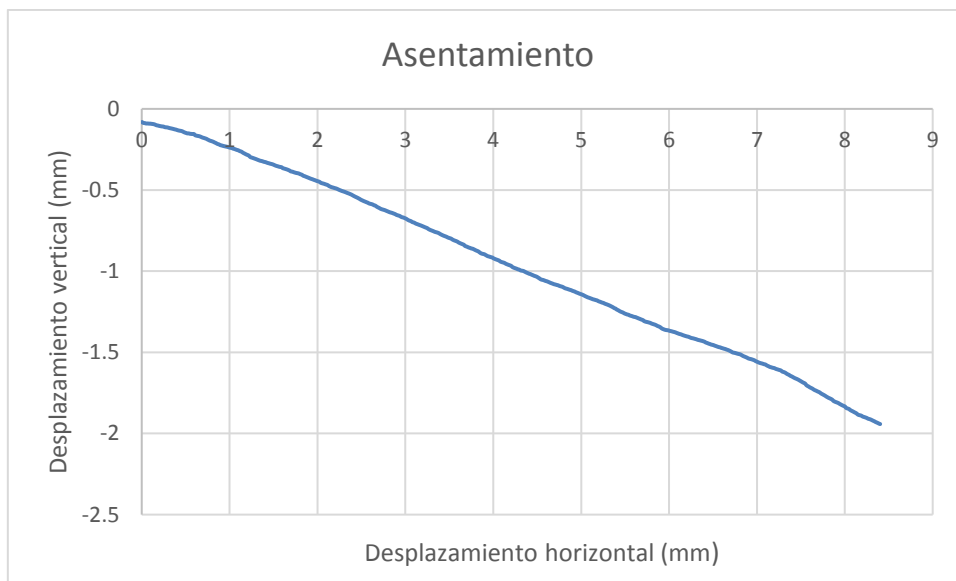


Gráfica 3.2.4 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

➤ EPS sometido a 15 kg en la máquina de corte directo.

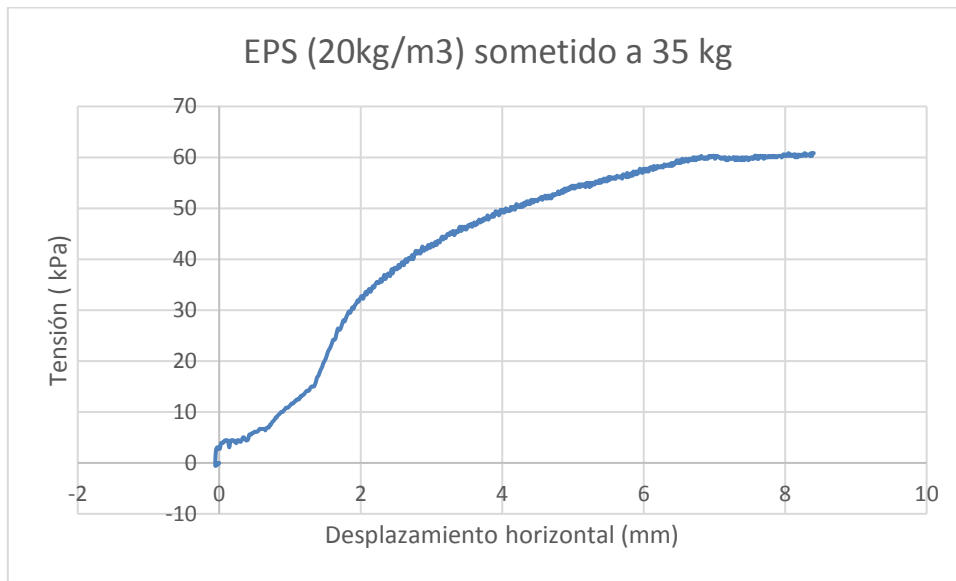


Gráfica 3.2.5 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

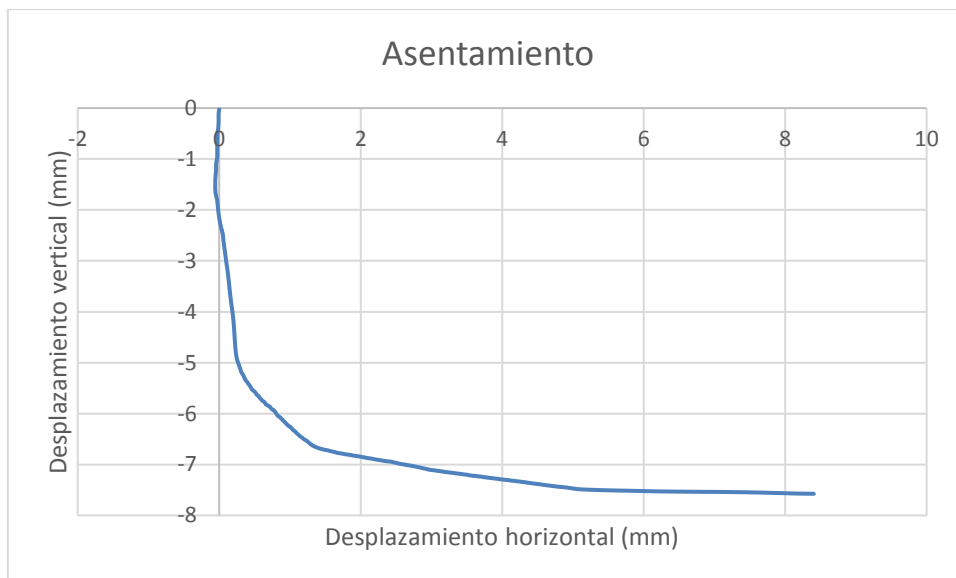


Gráfica 3.2.6 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

➤ EPS sometido a 35 kg en la máquina de corte directo.

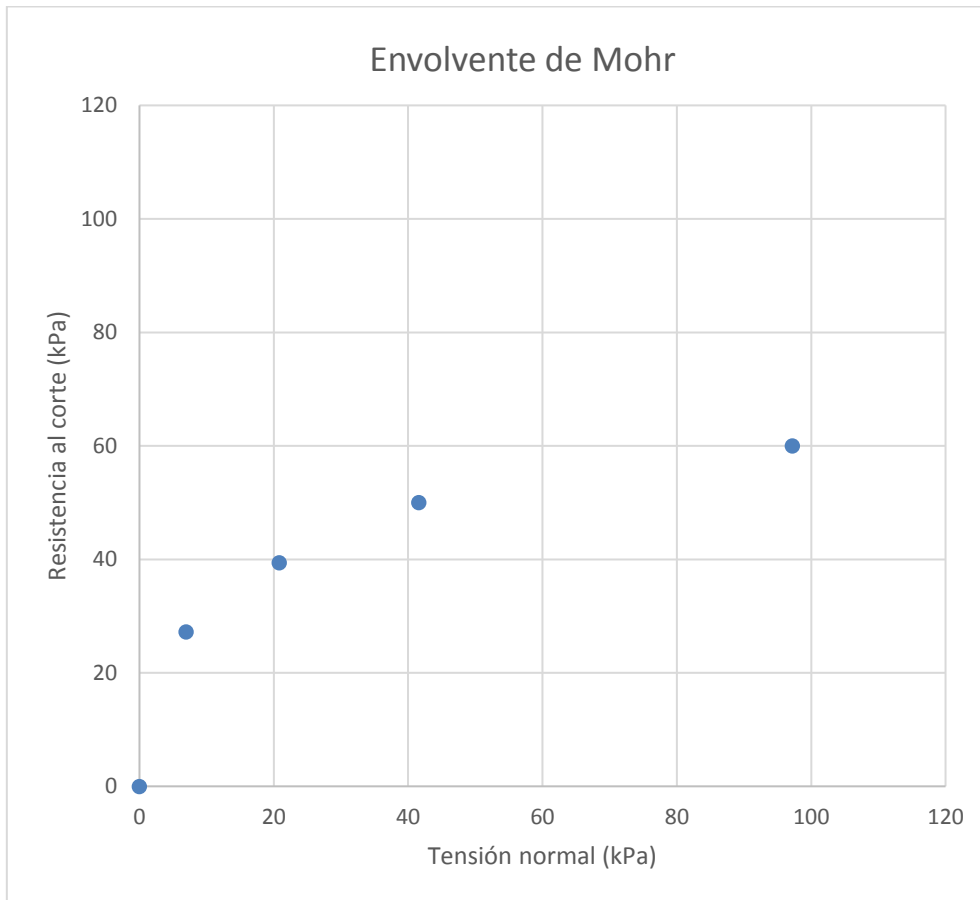


Gráfica 3.2.7 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano nítido



Gráfica 3.2.8 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

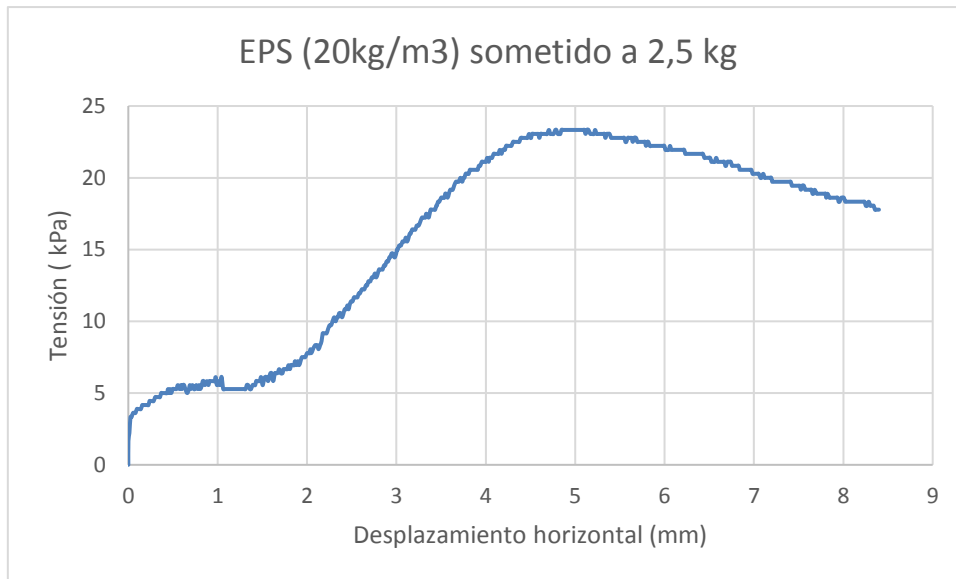
➤ Envolvente de Mohr.



Gráfica 3.2.9 Envolvente de Mohr EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

3.2.2 Ensayo EPS de densidad  $20 \text{ kg/m}^3$  con un plano irregular.

- EPS sometido a 2.5 kg en la máquina de corte directo.



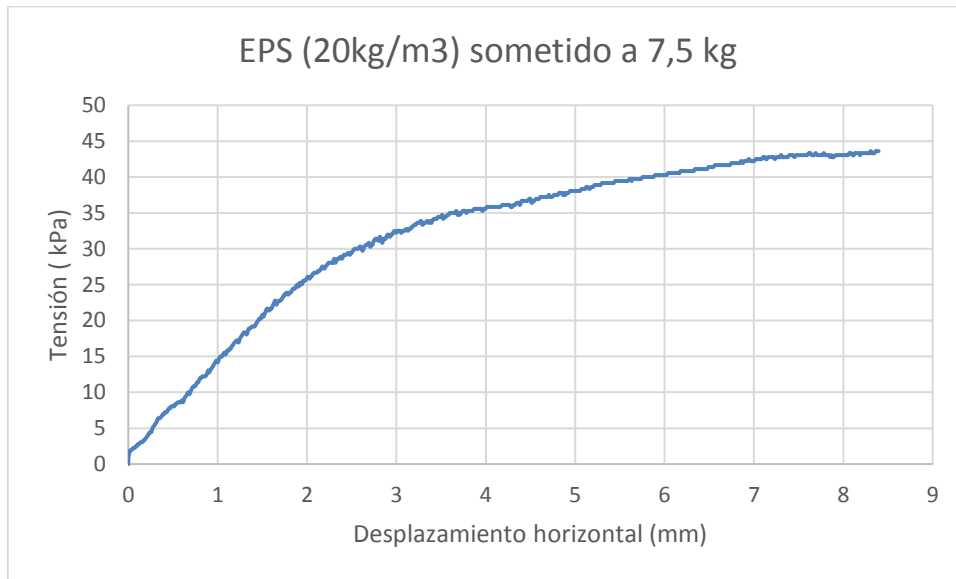
Gráfica 3.2.10 Ensayo EPS densidad  $20 \text{ kg/m}^3$  plano irregular



Gráfica 3.2.11 Ensayo EPS densidad  $20 \text{ kg/m}^3$  plano irregular



➤ EPS sometido a 7.5 kg en la máquina de corte directo.

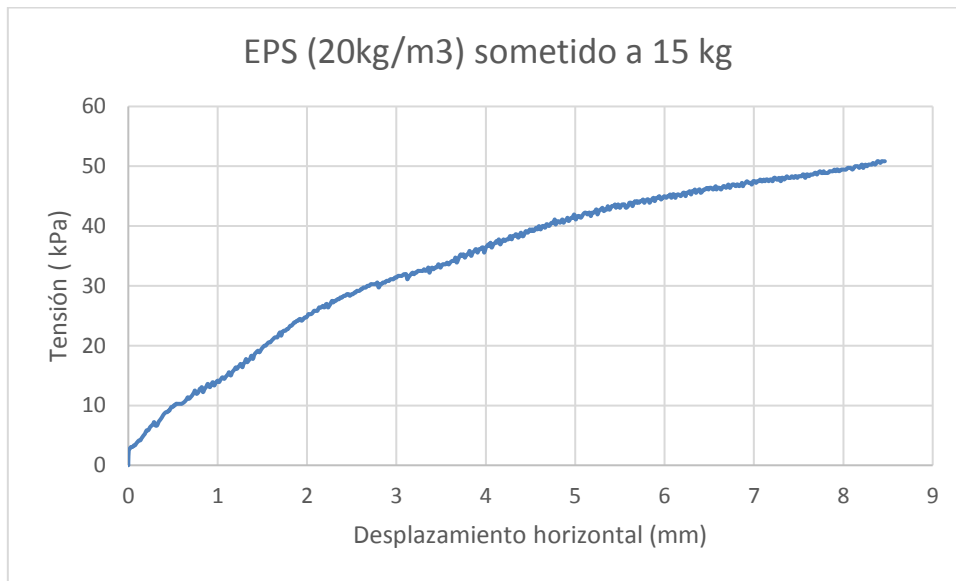


Gráfica 3.2.12 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

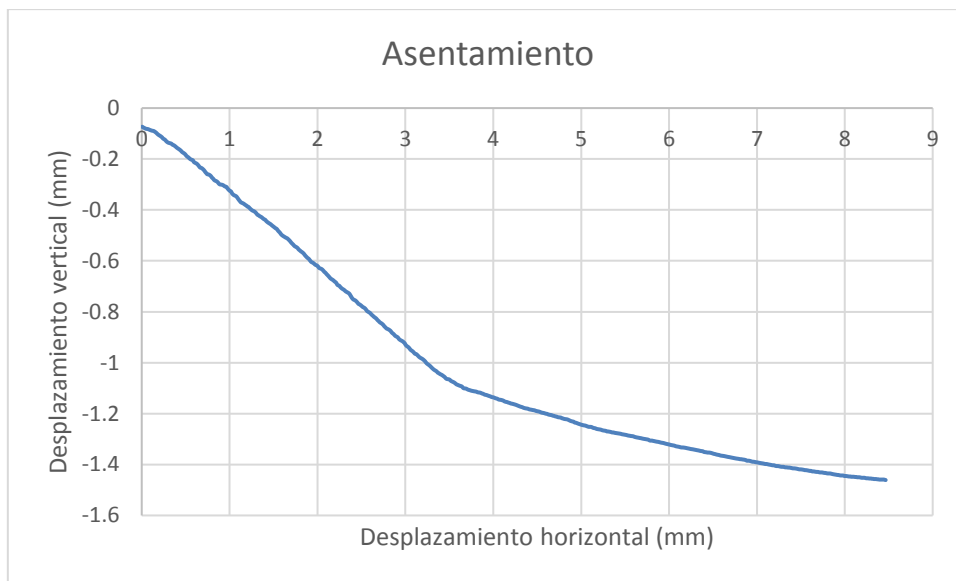


Gráfica 3.2.13 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

➤ EPS sometido a 15 kg en la máquina de corte directo.

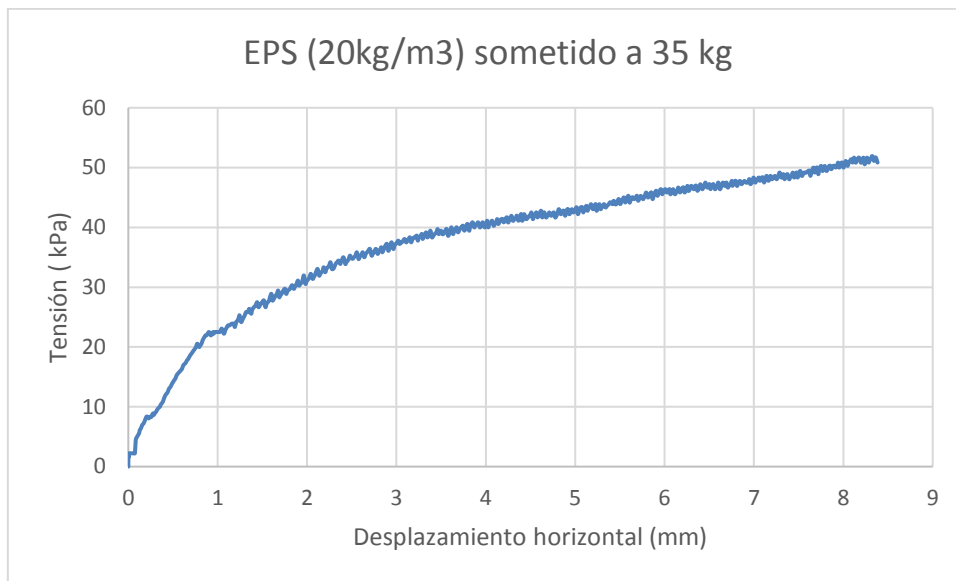


Gráfica 3.2.14 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

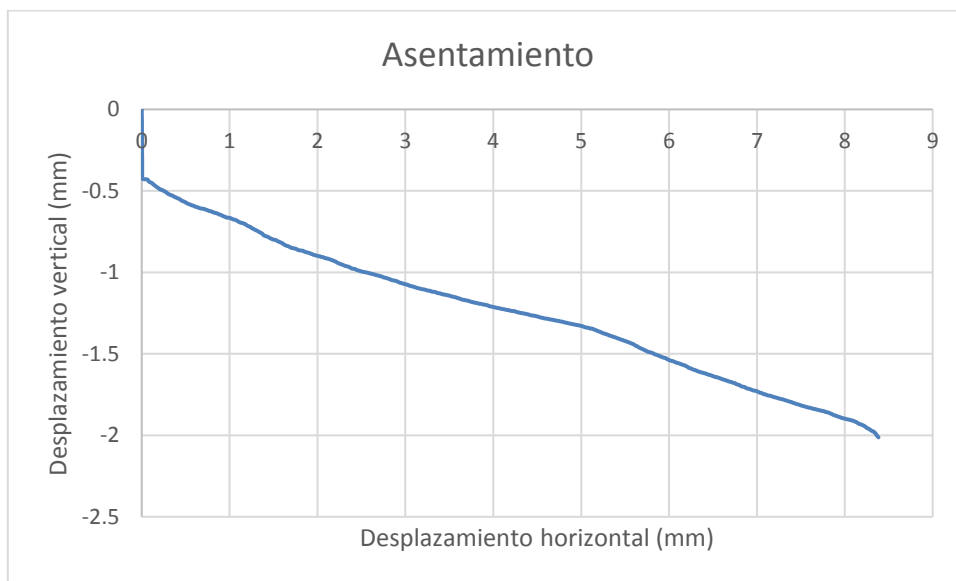


Gráfica 3.2.15 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

➤ EPS sometido a 35 kg en la máquina de corte directo.

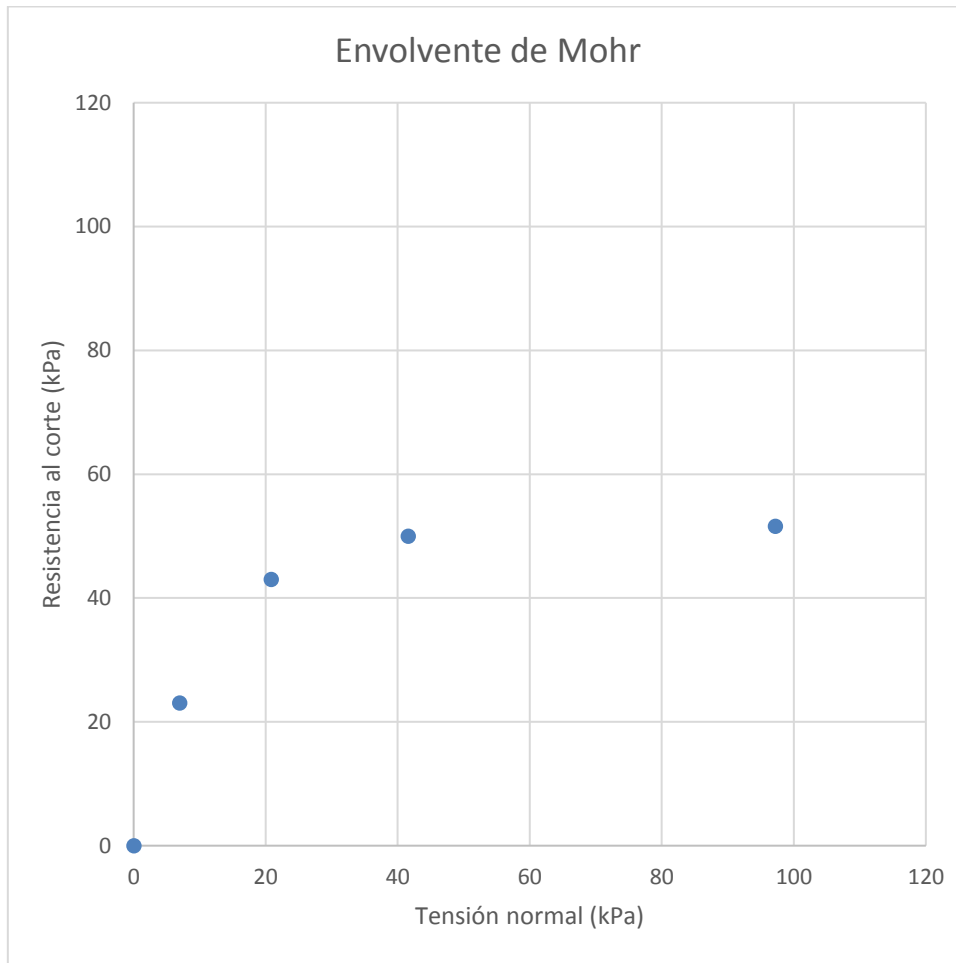


Gráfica 3.2.16 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano irregular



Gráfica 3.2.17 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

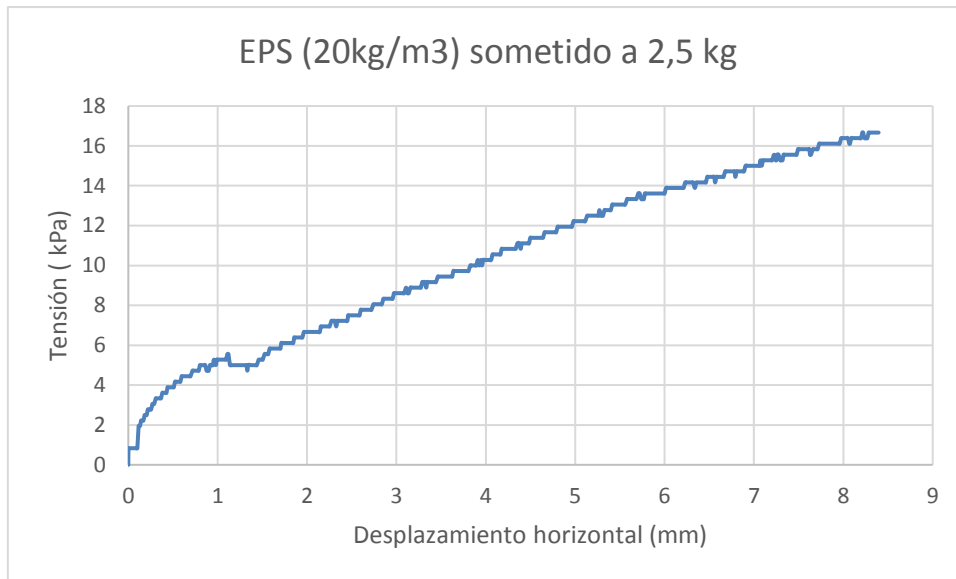
➤ Envolverte de Mohr.



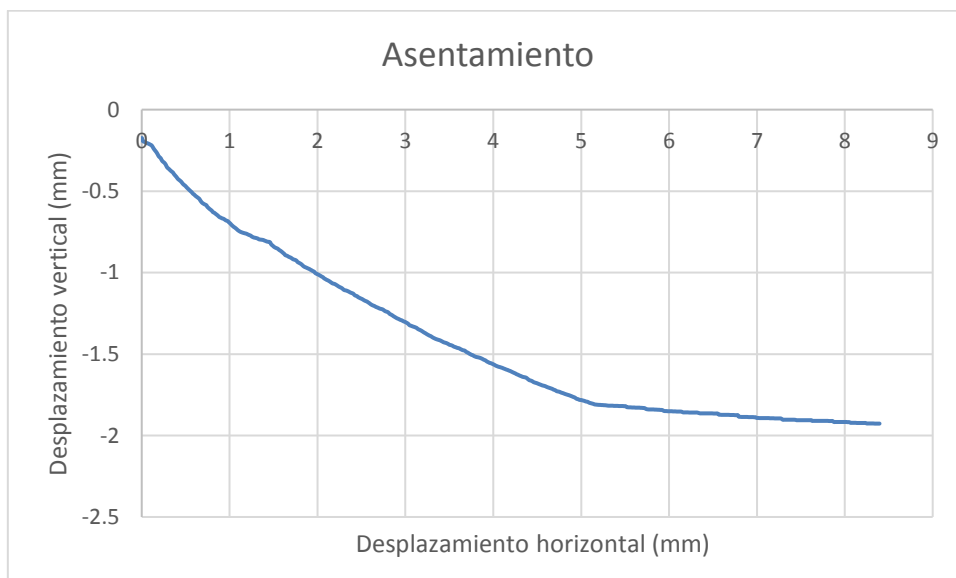
Gráfica 3.2.18 Envolverte de Mohr EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

3.2.3 Ensayo EPS de densidad  $20 \text{ kg/m}^3$  granulado.

- EPS sometido a 2.5 kg en la máquina de corte directo.

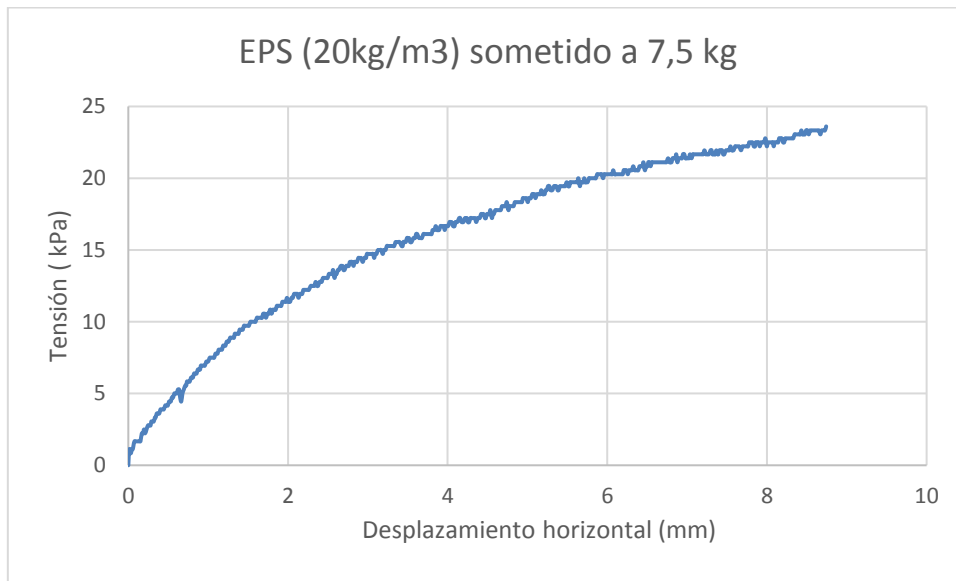


Gráfica 3.2.19 Ensayo EPS densidad  $20 \text{ kg/m}^3$  granulado

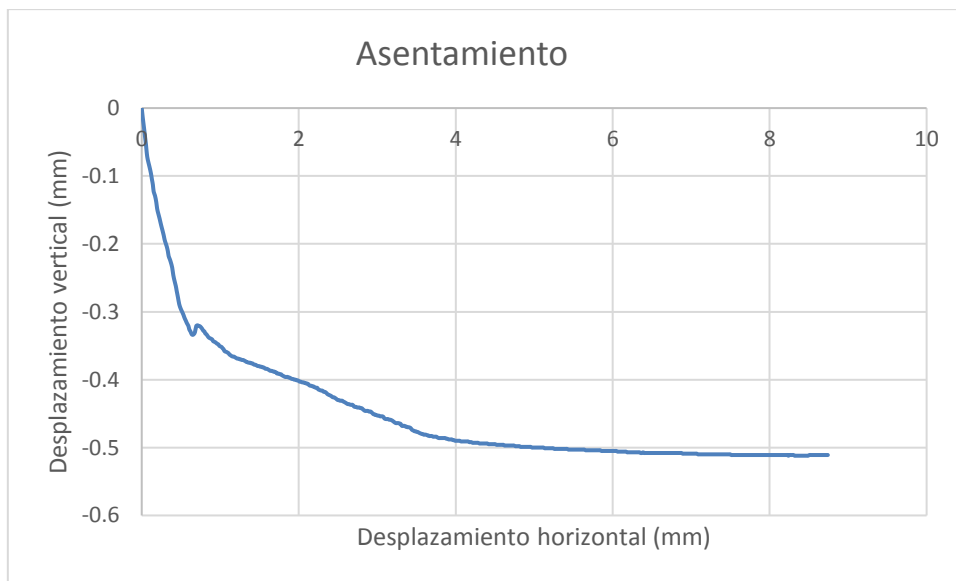


Gráfica 3.2.20 Ensayo EPS densidad  $20 \text{ kg/m}^3$  granulado

➤ EPS sometido a 7.5 kg en la máquina de corte directo.

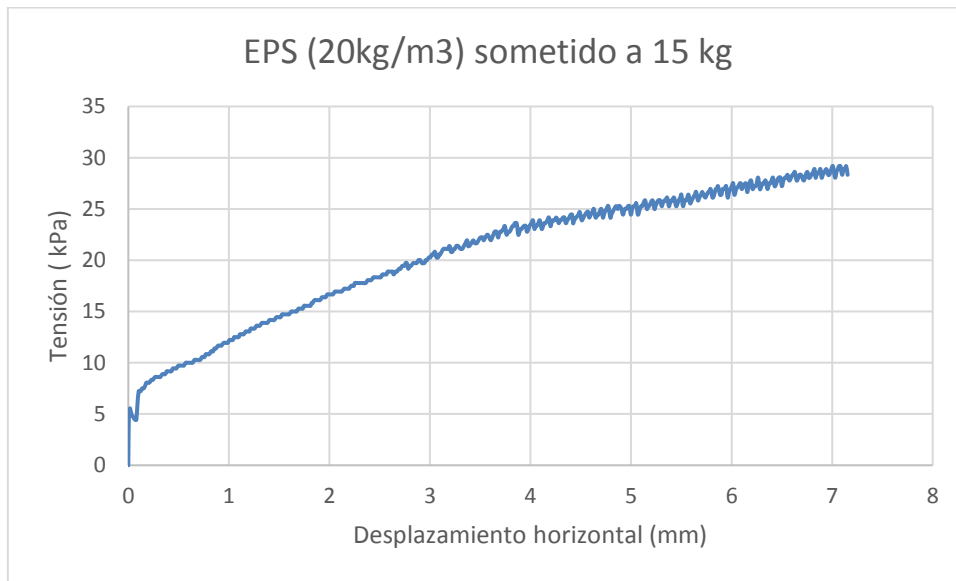


Gráfica 3.2.21 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> granulado

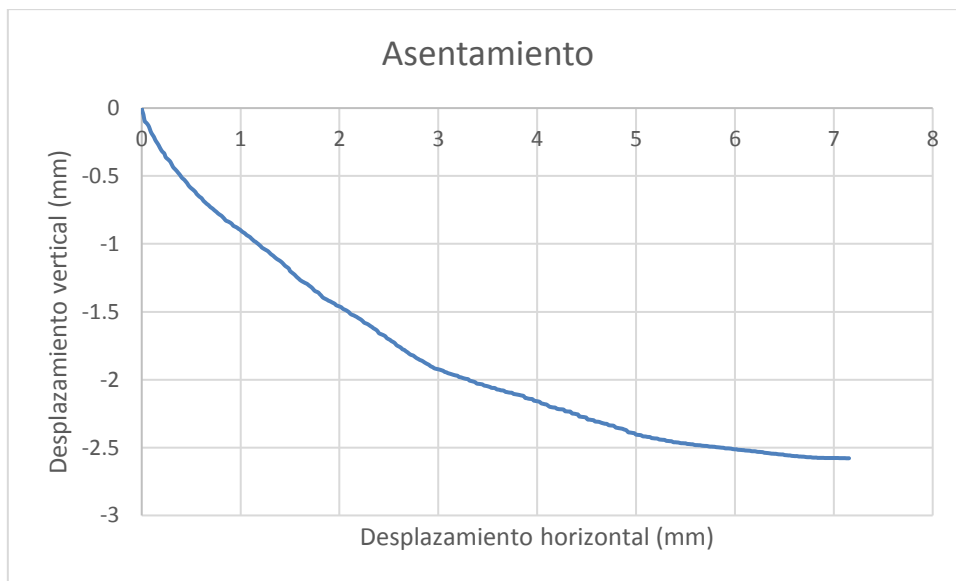


Gráfica 3.2.22 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> granulado

➤ EPS sometido a 15 kg en la máquina de corte directo.



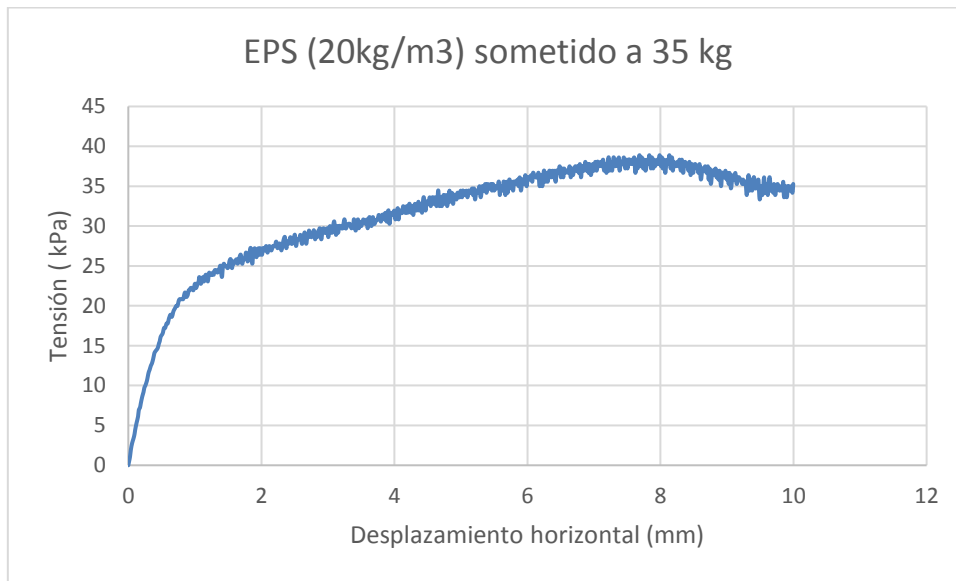
Gráfica 3.2.23 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> granulado



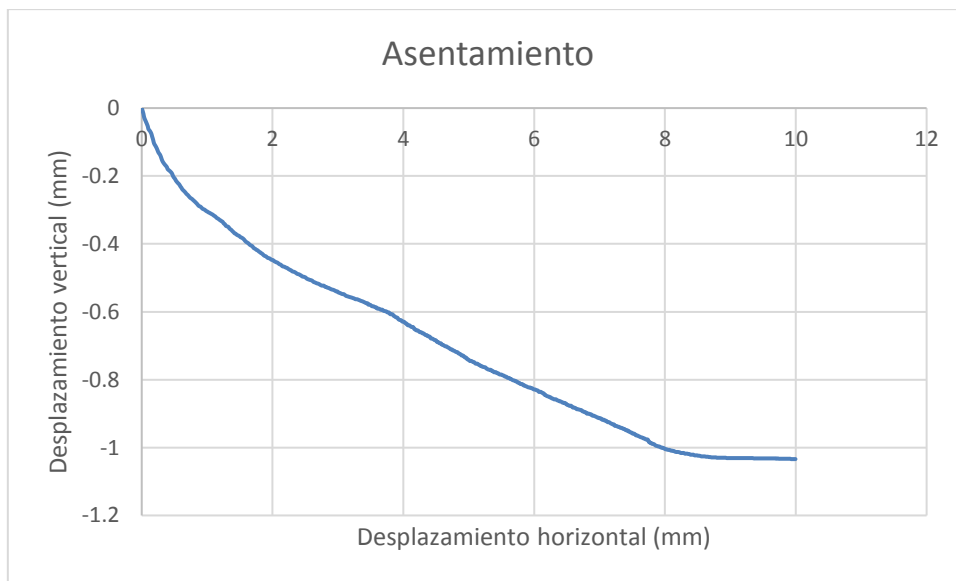
Gráfica 3.2.24 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> granulado



➤ EPS sometido a 35 kg en la máquina de corte directo.

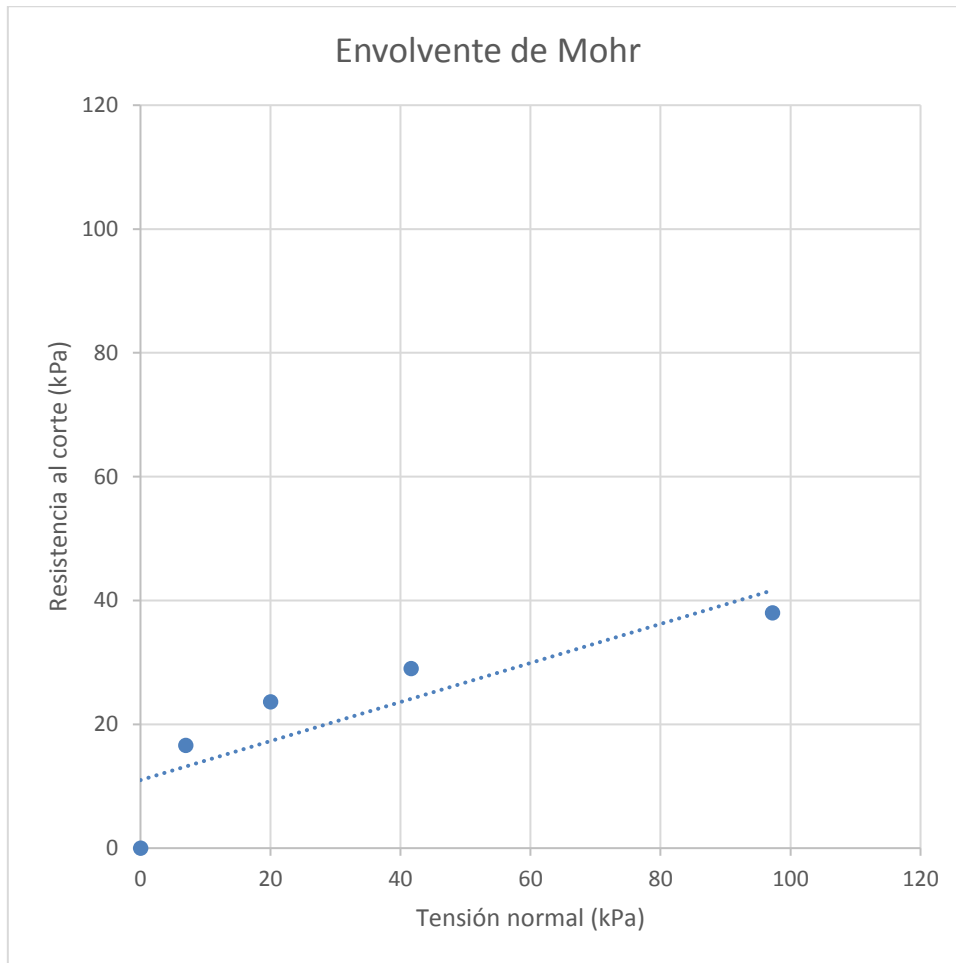


Gráfica 3.2.25 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> granulado



Gráfica 3.2.26 Ensayo EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> granulado

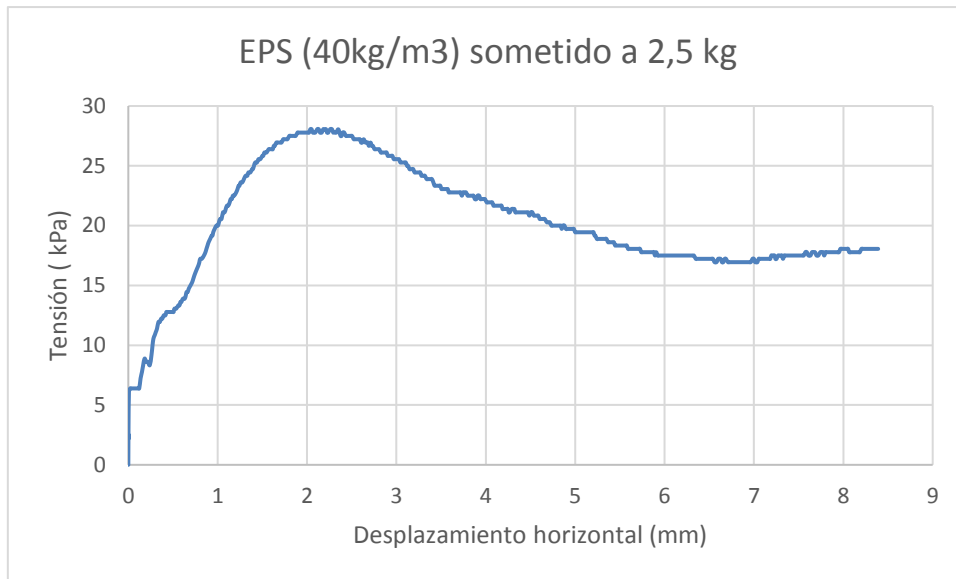
➤ Envolvente de Mohr.



Gráfica 3.2.27 Envolvente de Mohr EPS densidad 20 kg/m<sup>3</sup> granulado

3.2.4 Ensayo EPS de densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  con un plano nítido.

- EPS sometido a 2.5 kg en la máquina de corte directo.

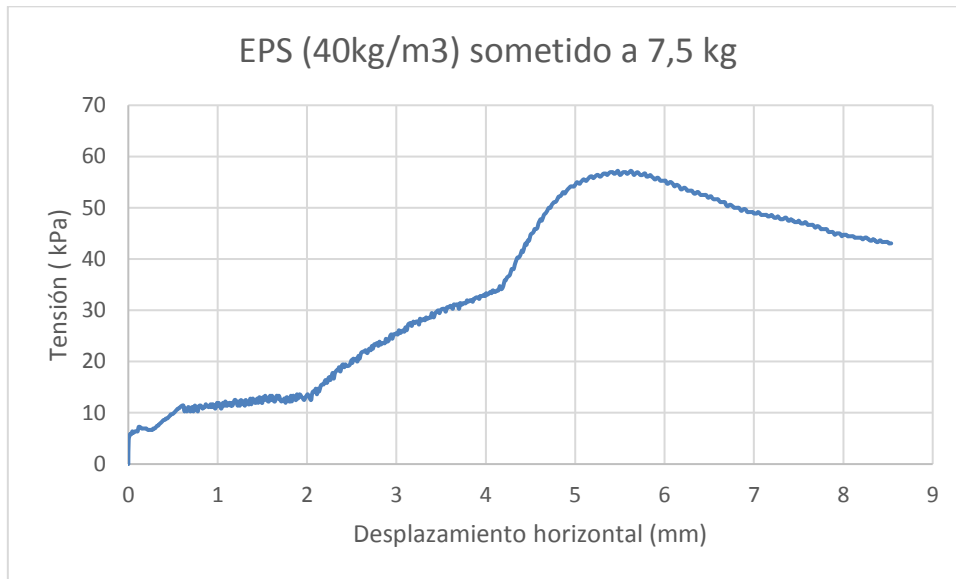


Gráfica 3.2.28 Ensayo EPS densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  plano nítido



Gráfica 3.2.29 Ensayo EPS densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  plano nítido

➤ EPS sometido a 7.5 kg en la máquina de corte directo.

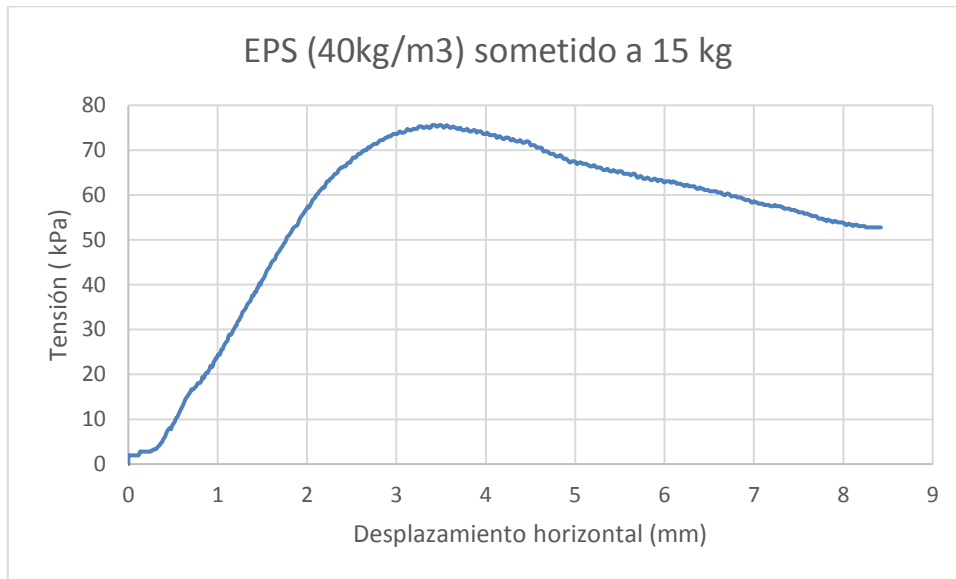


Gráfica 3.2.30 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

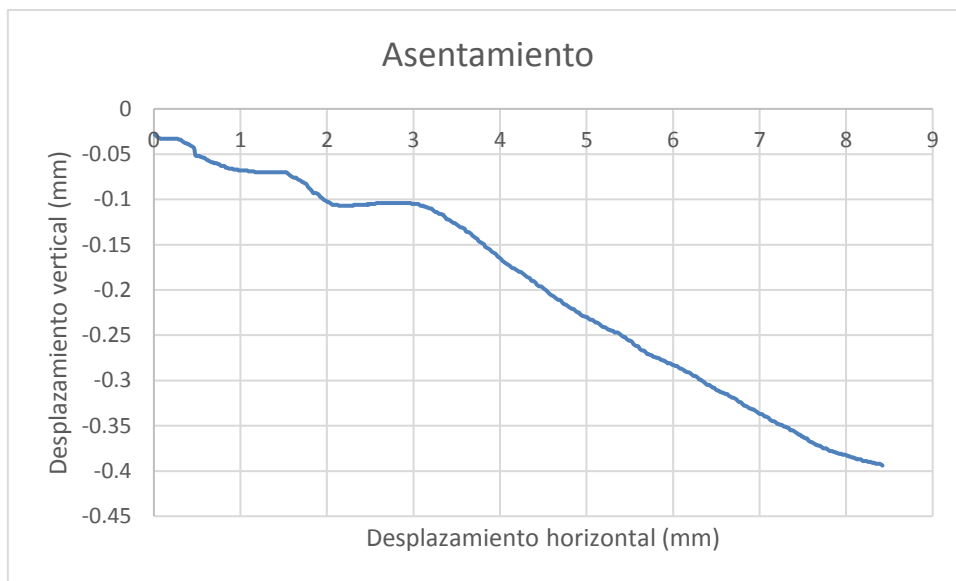


Gráfica 3.2.31 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

➤ EPS sometido a 15 kg en la máquina de corte directo.

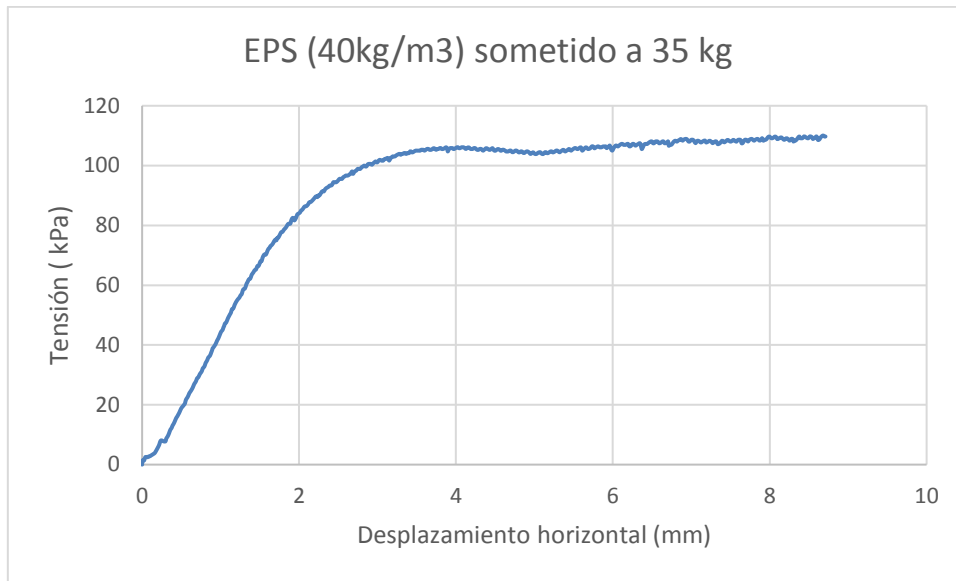


Gráfica 3.2.32 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

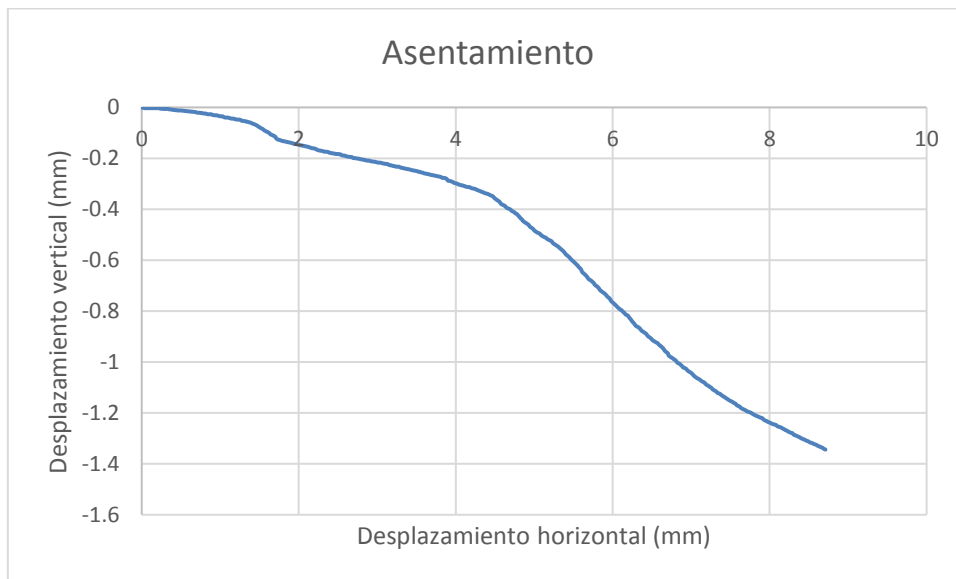


Gráfica 3.2.33 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

➤ EPS sometido a 35 kg en la máquina de corte directo.

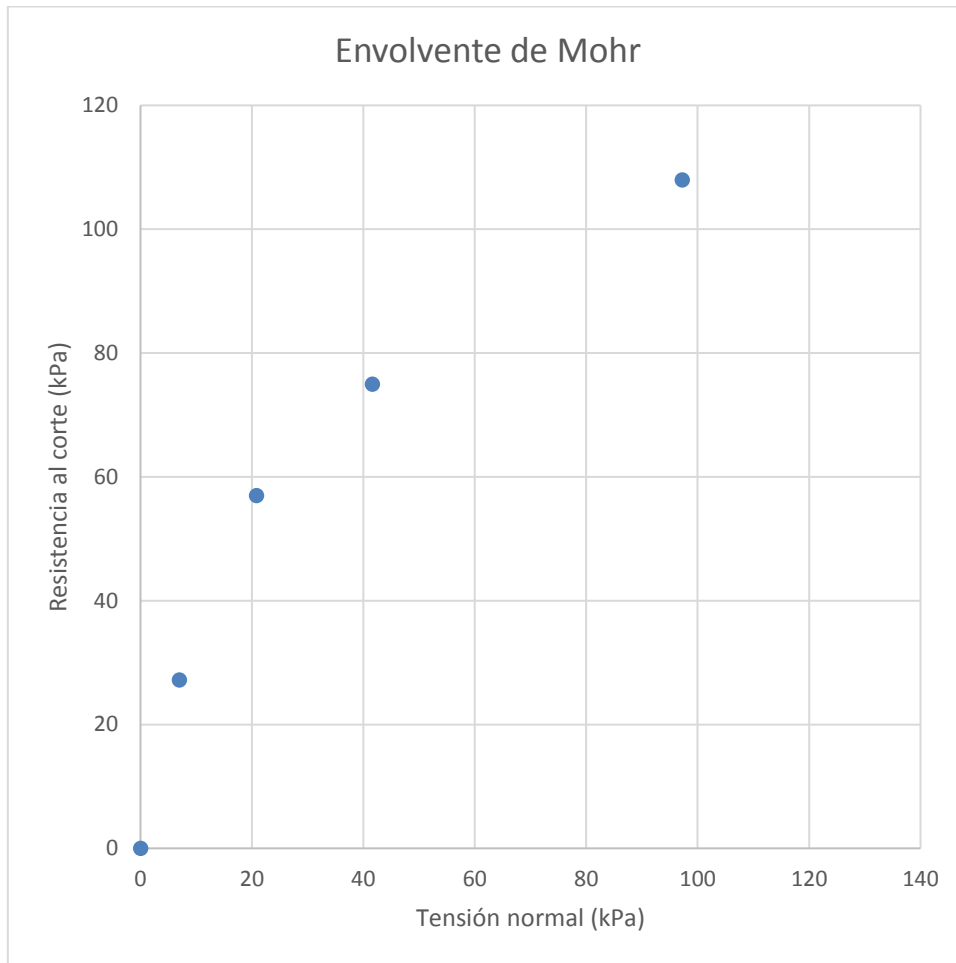


Gráfica 3.2.34 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano nítido



Gráfica 3.2.35 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

➤ Envolvente de Mohr.

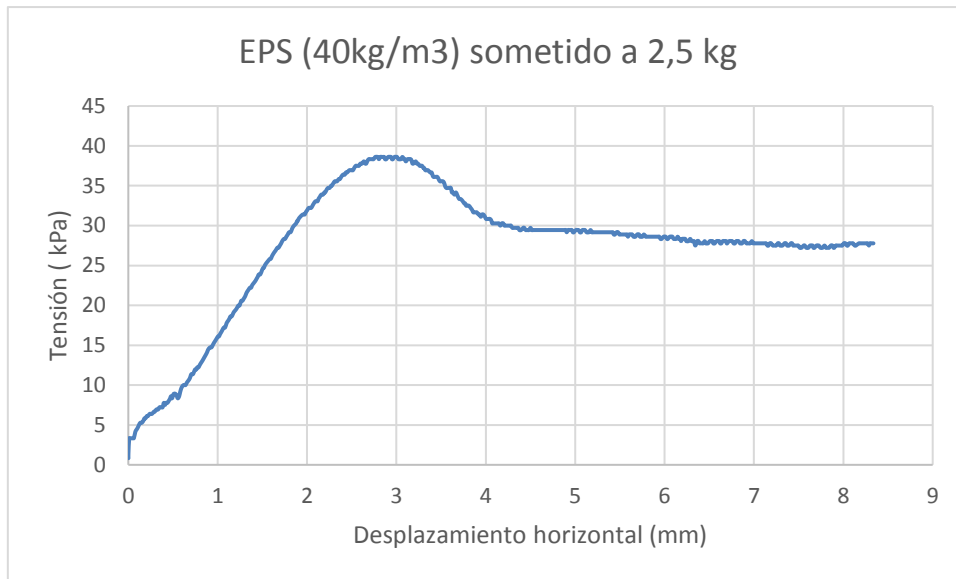


Gráfica 3.2.36 Envolvente de Mohr EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano nítido

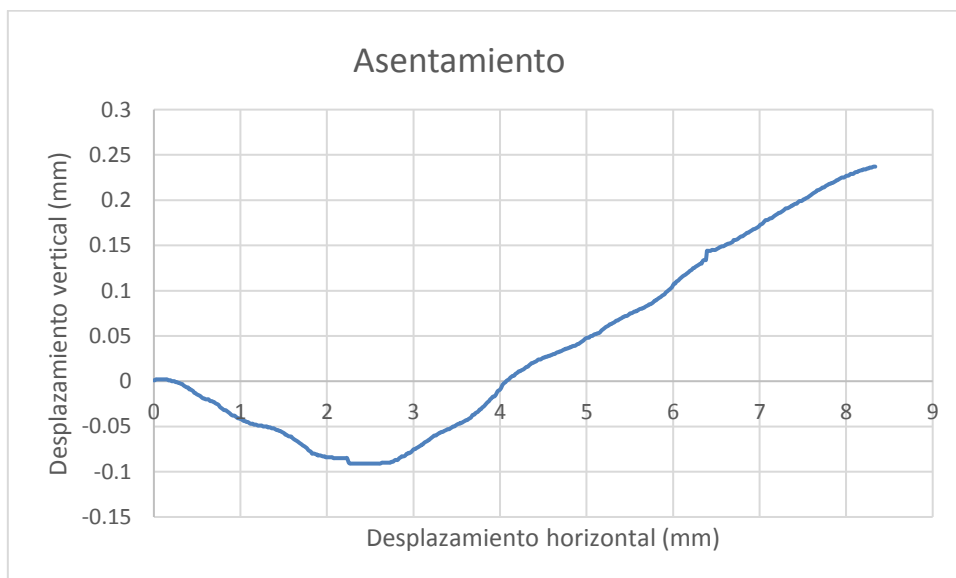


3.2.5 Ensayo EPS de densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  con un plano irregular.

- EPS sometido a 2.5 kg en la máquina de corte directo.

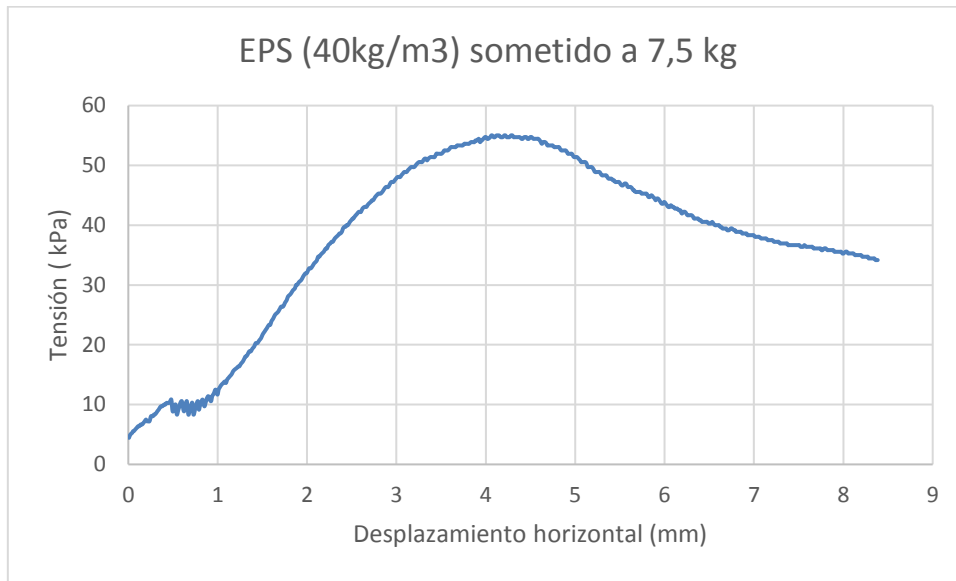


Gráfica 3.2.37 Ensayo EPS densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  plano irregular

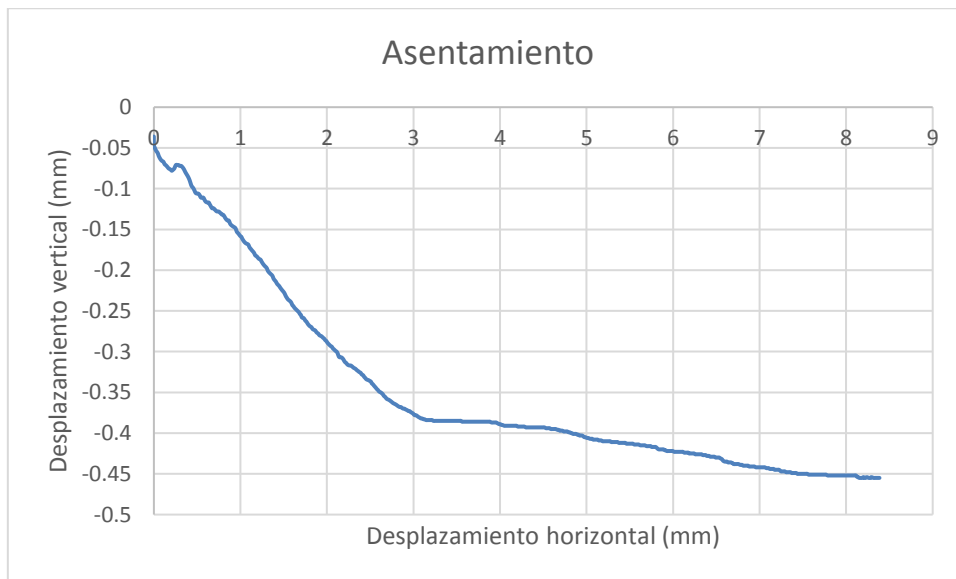


Gráfica 3.2.38 Ensayo EPS densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  plano irregular

➤ EPS sometido a 7.5 kg en la máquina de corte directo.

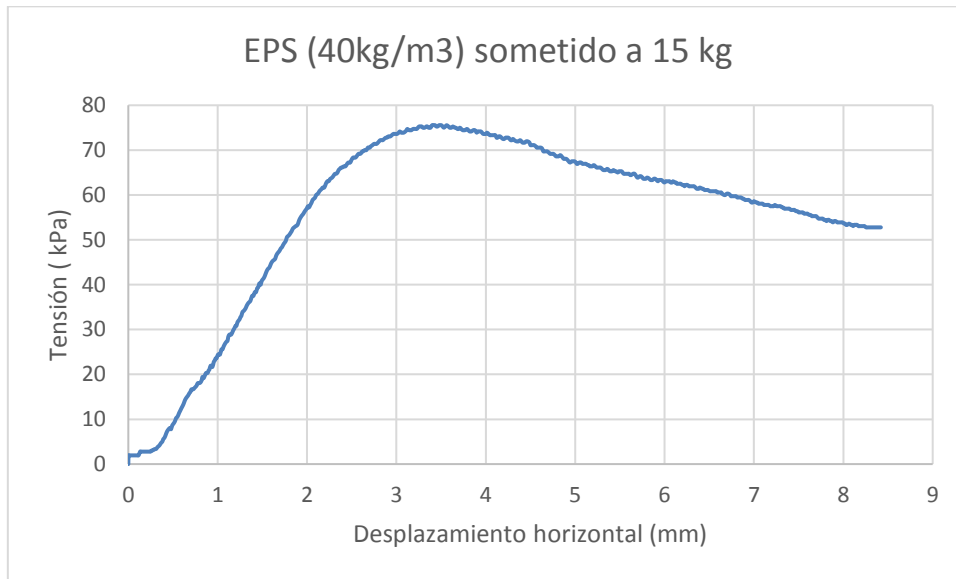


Gráfica 3.2.39 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

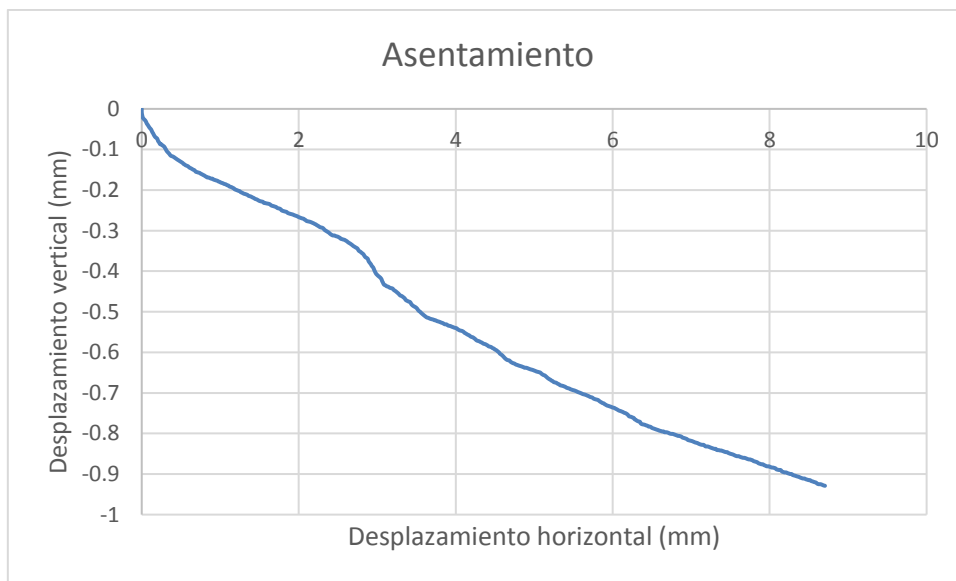


Gráfica 3.2.40 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

➤ EPS sometido a 15 kg en la máquina de corte directo.

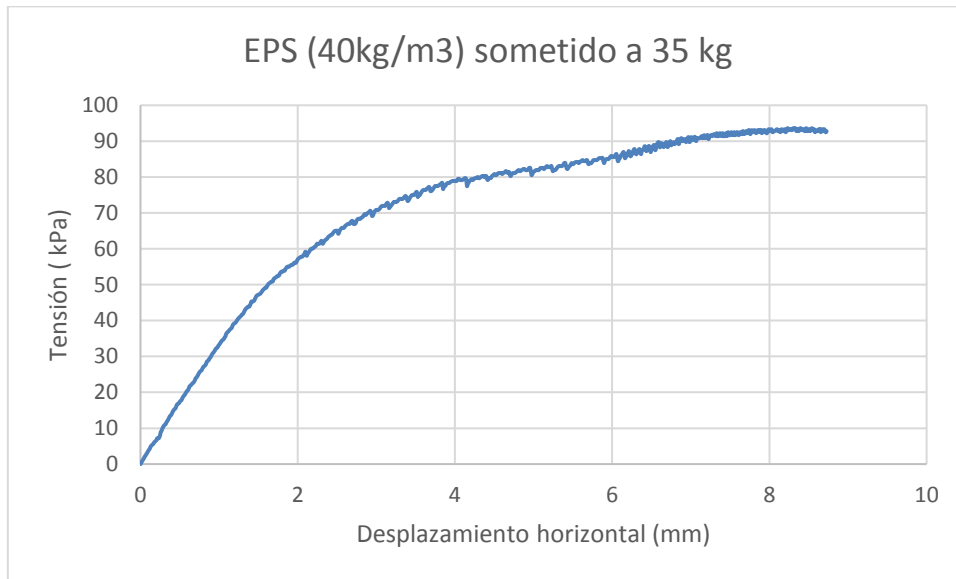


Gráfica 3.2.41 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

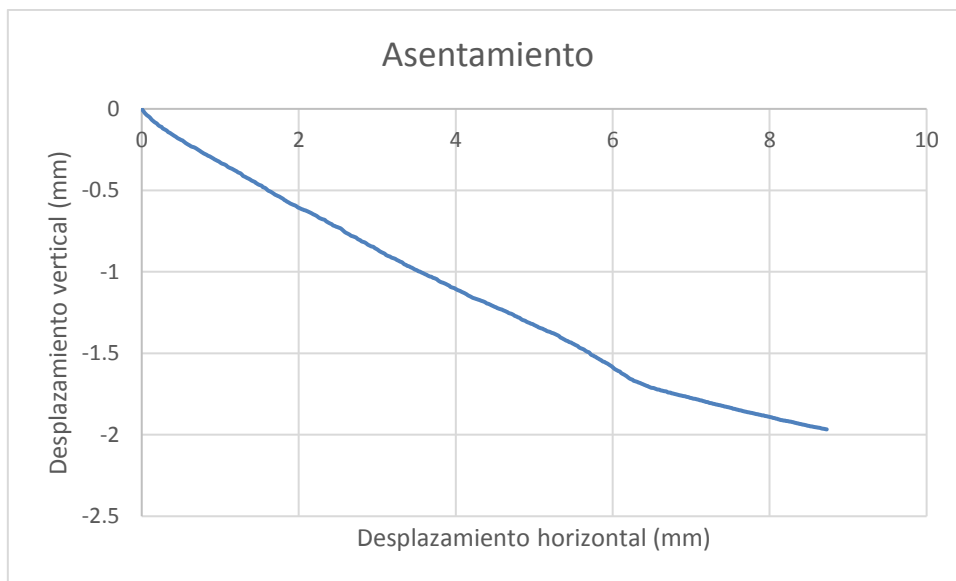


Gráfica 3.2.42 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

➤ EPS sometido a 35 kg en la máquina de corte directo.

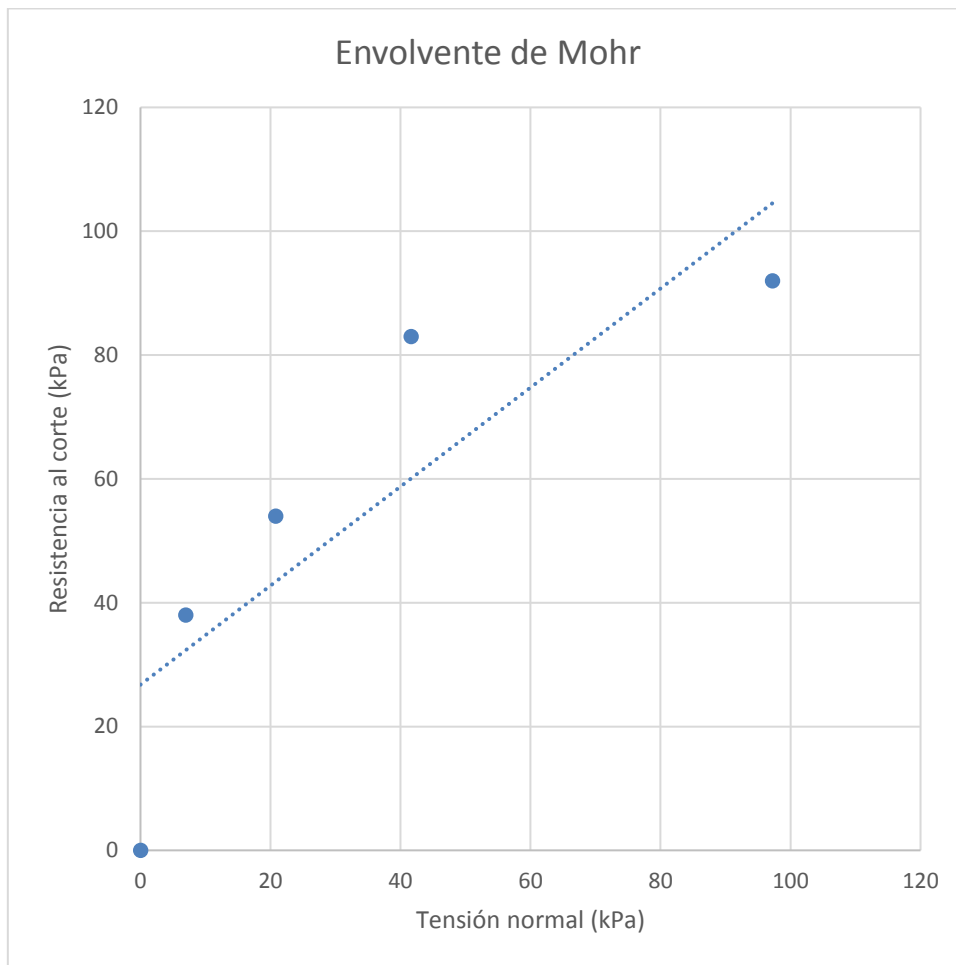


Gráfica 3.2.43 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano irregular



Gráfica 3.2.44 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

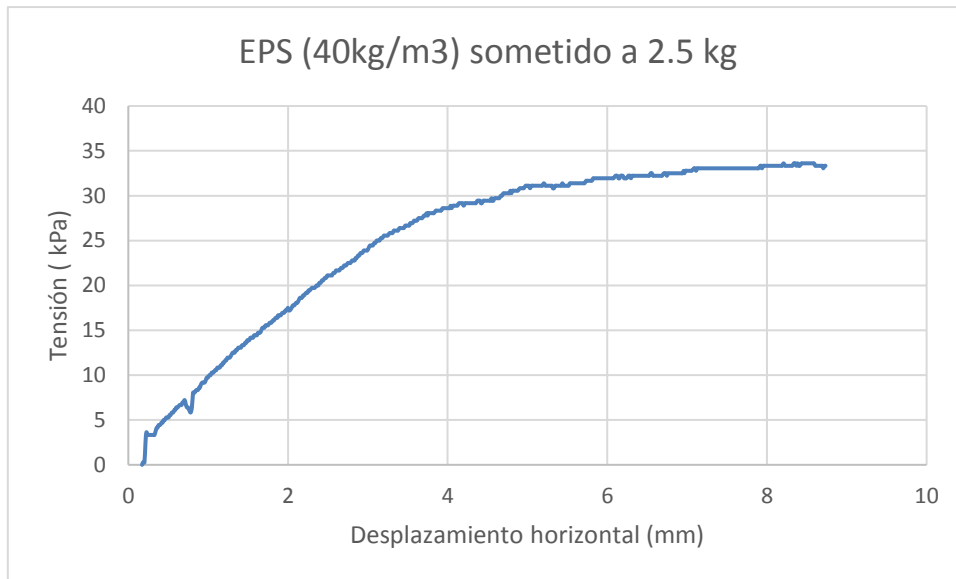
➤ Envolvente de Mohr.



Gráfica 3.2.45 Envolvente de Mohr EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> plano irregular

3.2.6 Ensayo EPS de densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  granulado.

- EPS sometido a 2.5 kg en la máquina de corte directo.

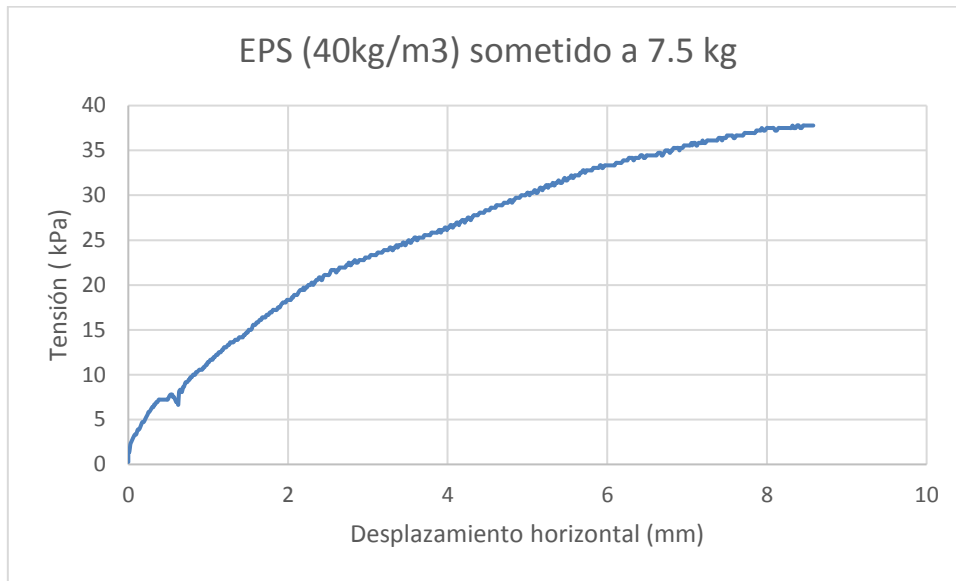


Gráfica 3.2.46 Ensayo EPS densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  granulado

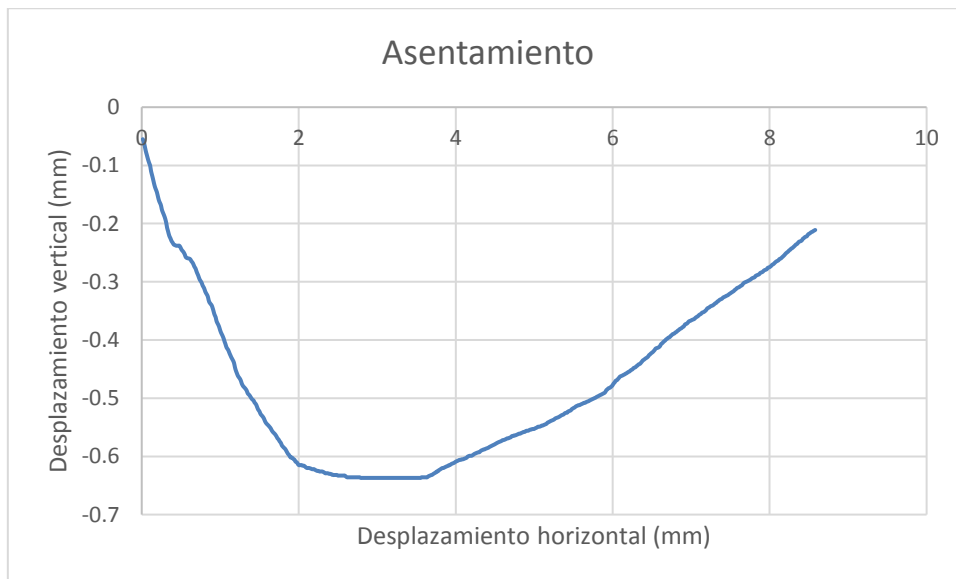


Gráfica 3.2.47 Ensayo EPS densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  granulado

➤ EPS sometido a 7.5 kg en la máquina de corte directo.



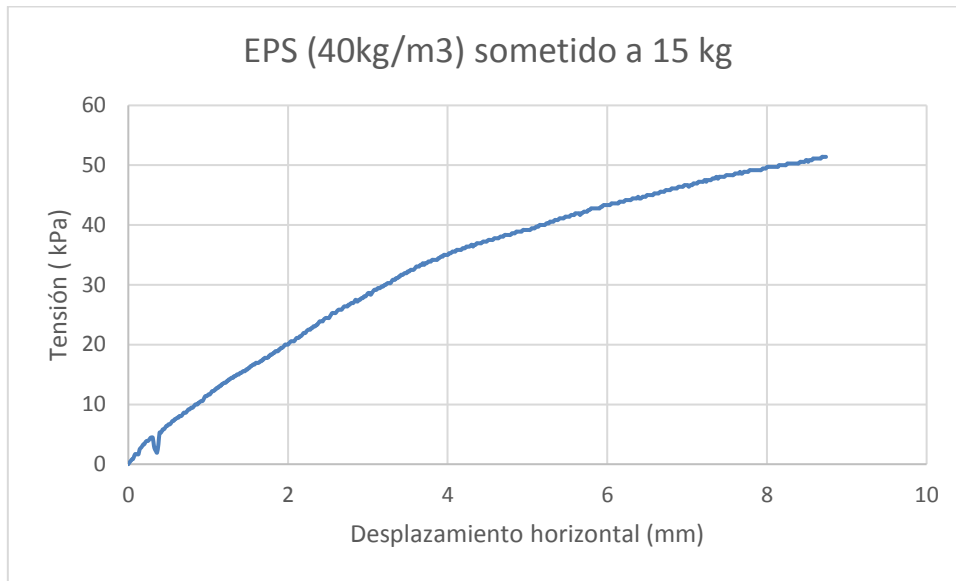
Gráfica 3.2.48 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> granulado



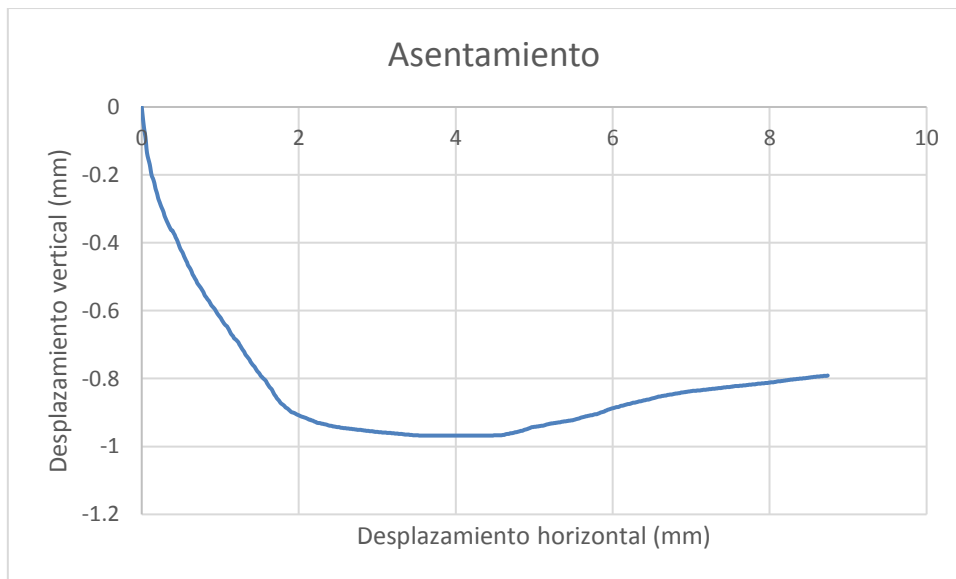
Gráfica 3.2.49 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> granulado



➤ EPS sometido a 15 kg en la máquina de corte directo.

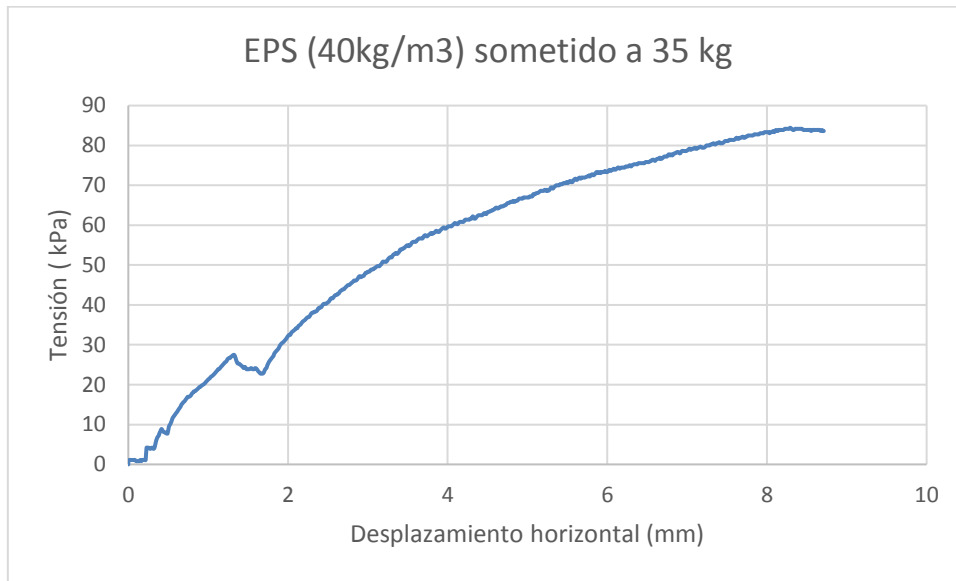


Gráfica 3.2.50 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> granulado

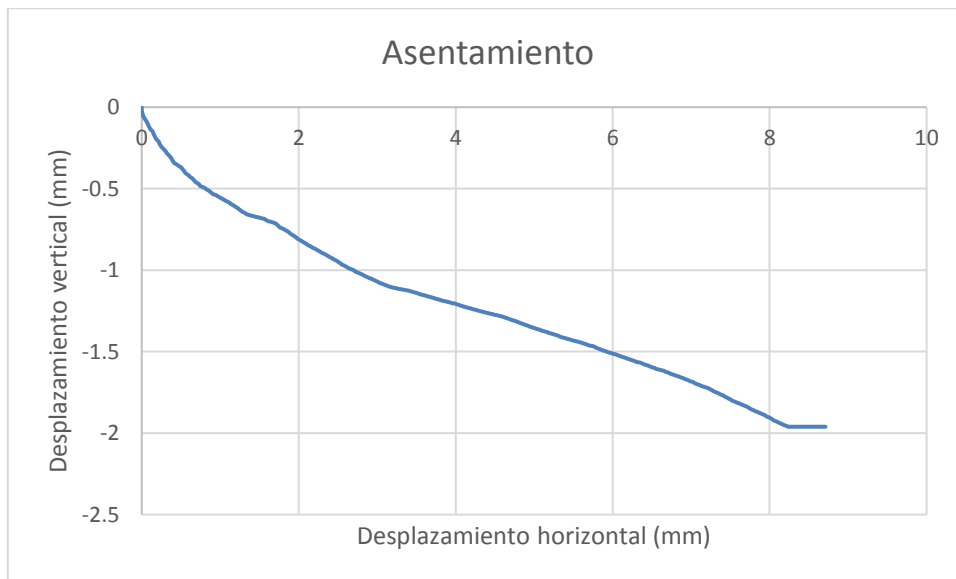


Gráfica 3.2.51 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> granulado

➤ EPS sometido a 35 kg en la máquina de corte directo.

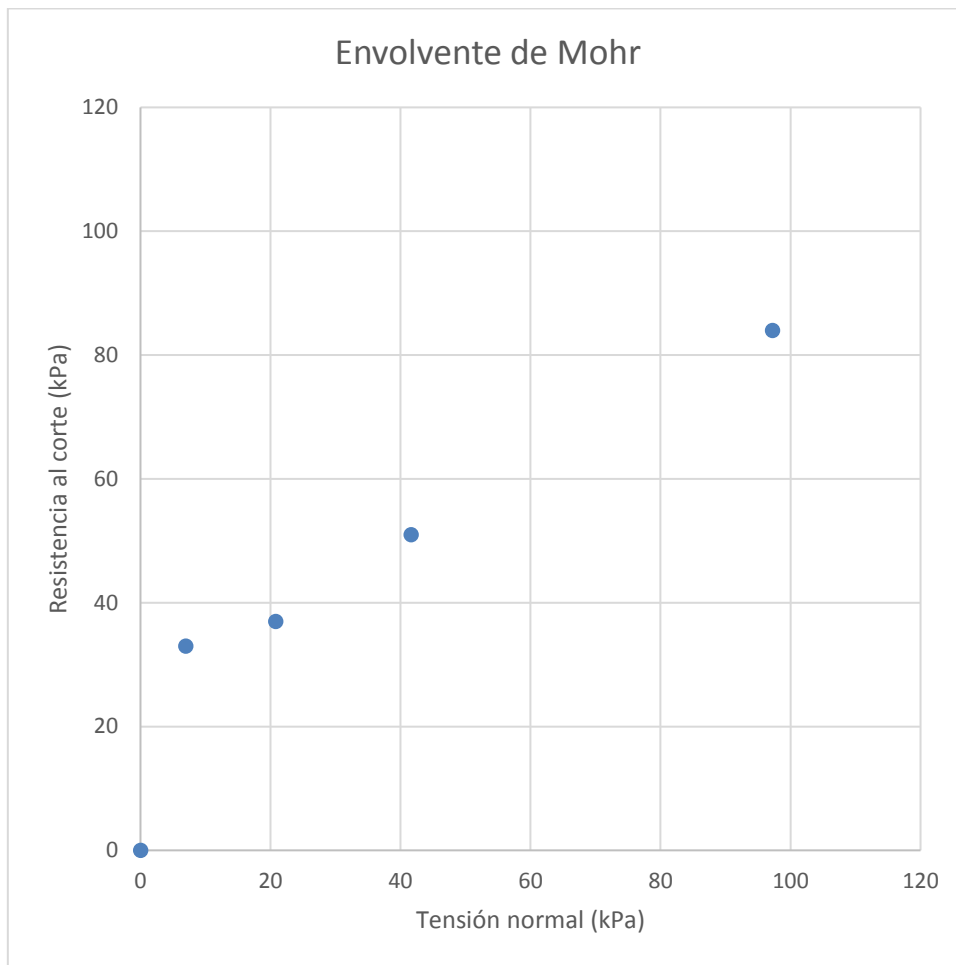


Gráfica 3.2.52 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> granulado



Gráfica 3.2.53 Ensayo EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> granulado

➤ Envolvente de Mohr.



Gráfica 3.2.54 Envolvente de Mohr EPS densidad 40 kg/m<sup>3</sup> granulado

### 3.3 Discusión resultados de los ensayos de corte.

En el caso del EPS de densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  se puede apreciar que tanto para el plano de corte nítido como para el plano de corte irregular aparece una resistencia pico y una resistencia residual (Gráfica 3.2.28) (Gráfica 3.2.37,) que nos recuerda mucho a la que se da por ejemplo en las arenas. Esta resistencia pico y resistencia residual va convirtiéndose en una sola conforme más carga se le pone al ensayo de corte directo, llegando a quedarse en una única resistencia cuando se realiza el ensayo con carga de 35 kg (Gráfica 3.2.34). En el caso de las muestras desgranadas no se aprecian picos, esto quiere decir que siempre se da un aumento de la resistencia (Gráfica 3.2.48).

En cuanto al asiento que se produce, se puede apreciar que a baja tensión se produce un asiento y luego pasa a aumentar la muestra, esto se puede dar debidos a dos causas principales. La primera se daría en los planos de corte nítido e irregular en los cuales al poco de comenzar el ensayo las muestras se contarían en la célula de corte, la segunda se daría en las muestras desgranadas en las cuales como se aprecia en las gráficas anteriores, cuanto más pequeña es la carga que se le pone al ensayo más fácil es que las muestras se expandan en el mismo. Esto es debido a que al introducir las muestras en la célula de corte las tenemos que introducir a presión por lo que si hay una carga pequeña en el aparato de corte directo esta no podrá hacer frente a la presión interna que se da en la muestra y esta tiende a expandirse (Gráfica 3.2.47).

Para el resto de los casos se puede decir que se da una dilatación negativa, es decir, que las muestras se comprimen únicamente (Gráfica 3.2.44).

Para el caso del EPS de densidad  $20 \text{ kg/m}^3$  se puede observar que tanto para el plano nítido como para el plano irregular cuando se le aplica una carga baja se produce el mismo efecto que en las muestras de EPS de densidad  $40 \text{ kg/m}^3$  (Gráfica 3.2.41). Mientras que para el resto de las muestras de plano nítido y las de plano irregular se puede observar como siempre se da un aumento de la resistencia no llegando a tener picos. Esto mismo ocurre con las muestras de material desgranado (Gráfica 3.2.50).

En el caso de los asientos producidos en todas las muestras de EPS con densidad  $20 \text{ kg/m}^3$  se aprecia una dilatación negativa, las muestras únicamente se comprimen.

Por último, decir que en cuanto a la fricción se refiere el EPS de  $20 \text{ kg/m}^3$  tiene una fricción en torno a  $20\text{-}25^\circ$  mientras que el EPS de  $40 \text{ kg/m}^3$  tiene una fricción de unos  $40^\circ$  aproximadamente.

## 4 Aplicaciones

### 4.1 Caso 1: Terraplén.

En esta primera aplicación se va a comprobar cómo se comportan dos terraplenes diferentes. El primero estaría formado por una arena en buen estado y un material EPS degradado (Ilustración 4.1). El segundo estaría formado por arena en buen estado y arena degradada (Ilustración 4.2).

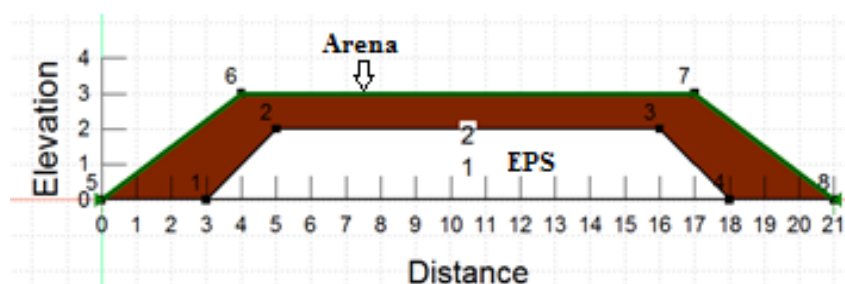


Ilustración 4.1 terraplén arena-EPS

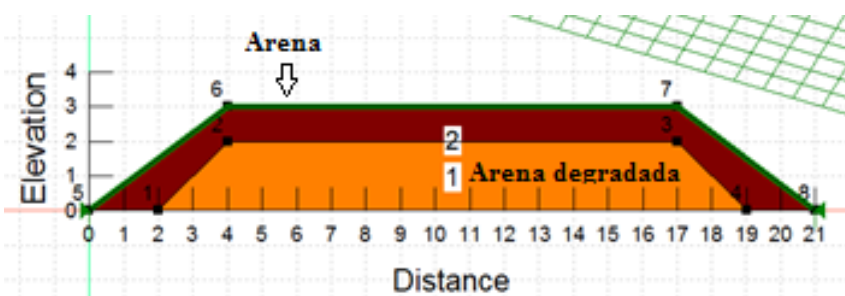


Ilustración 4.2 terraplén arena-arena degradada

Antes de empezar a introducir datos en el programa Geoestudio 2018 SLOPE/W se obtendrán las dimensiones del terraplén que se quiere estudiar. En este caso es un terraplén que se utilizará para construir una carretera por lo que habrá que utilizar el PG3 para obtener las dimensiones:

- Anchura de la carretera :12.2 m.
- Inclinación del terraplén 3H/2V  $\rightarrow$  34°.
- Altura del terraplén 3 m .

Con estos datos se obtiene el terraplén deseado para el estudio (Ilustración 4.3).

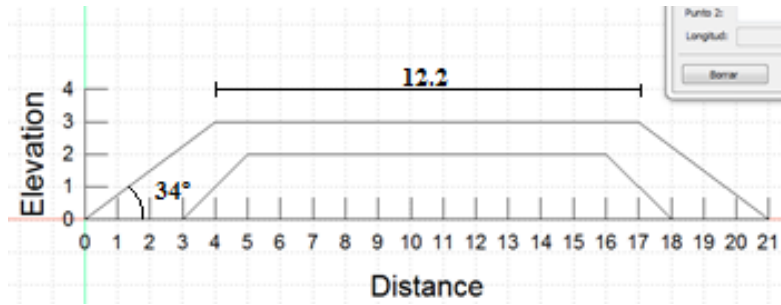


Ilustración 4.3 Medidas terraplén (m)

Una vez obtenidas las dimensiones deseadas del terraplén, se obtienen las características de los distintos materiales a utilizar.

- Material EPS degradado:
  - i. Cohesión = 0 kPa.
  - ii. Densidad = 40 kg/m<sup>3</sup>.
  - iii. Angulo de rozamiento interno/ fricción = 30° → este ángulo se ha obtenido a través de la envolvente de Mohr y se puede observar en la (ilustración 4.4).

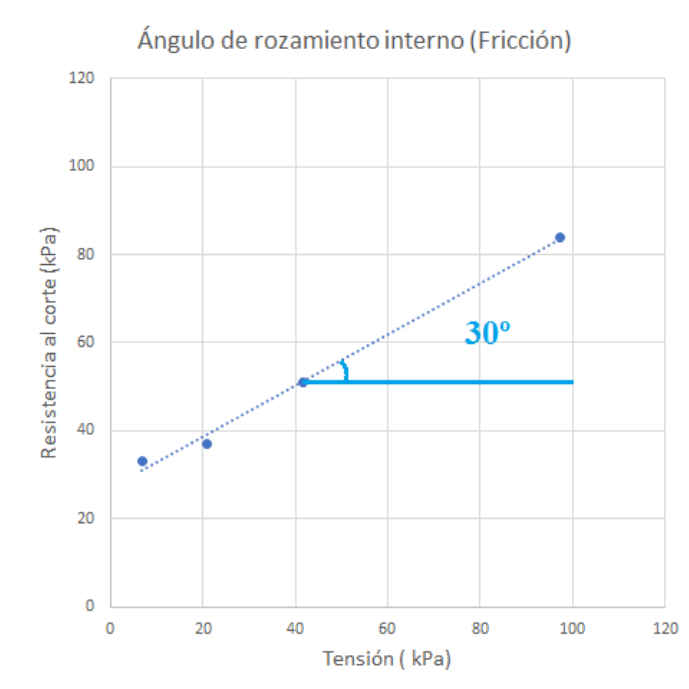


Ilustración 4.4 obtención ángulo de rozamiento interno

- Arena en buen estado
  - i. Cohesión = 10 kPa.
  - ii. Peso unitario= 19 kN/m<sup>3</sup>.
  - iii. Angulo de rozamiento interno/ fricción= 36°.
  
- Arena degradada.
  - iv. Cohesión = 0 kPa.
  - v. Peso unitario= 19 kN/m<sup>3</sup>.
  - vi. Angulo de rozamiento interno/ fricción= 12°.

Teniendo ya las características de todos los materiales, las dimensiones del terraplén y gracias al programa GeoStudio 2018 se obtendrán los datos necesarios para comparar los dos terraplenes planteados anteriormente.

Datos obtenidos:

1. Terraplén formado por arena y EPS degradado.

Una vez introducidos todos los datos en el programa y dándole al botón de calcular, se obtiene la siguiente ilustración en la que se puede observar el factor de seguridad (ilustración 4.5).

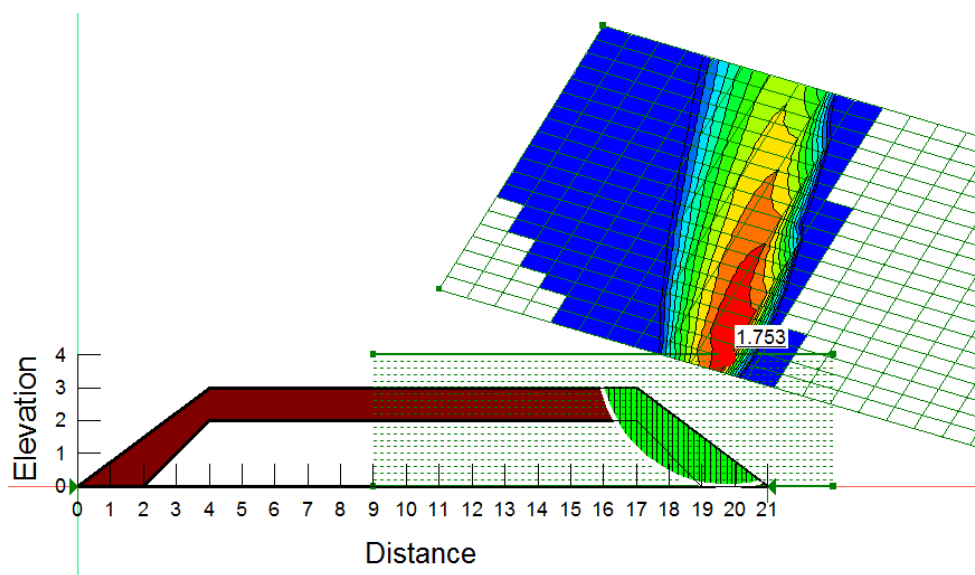


Ilustración 4.5 factor de seguridad

Si se quisiera ver el factor de seguridad de otro círculo, solo se tendría que seleccionar otra superficie de deslizamiento (ilustración 4.6).

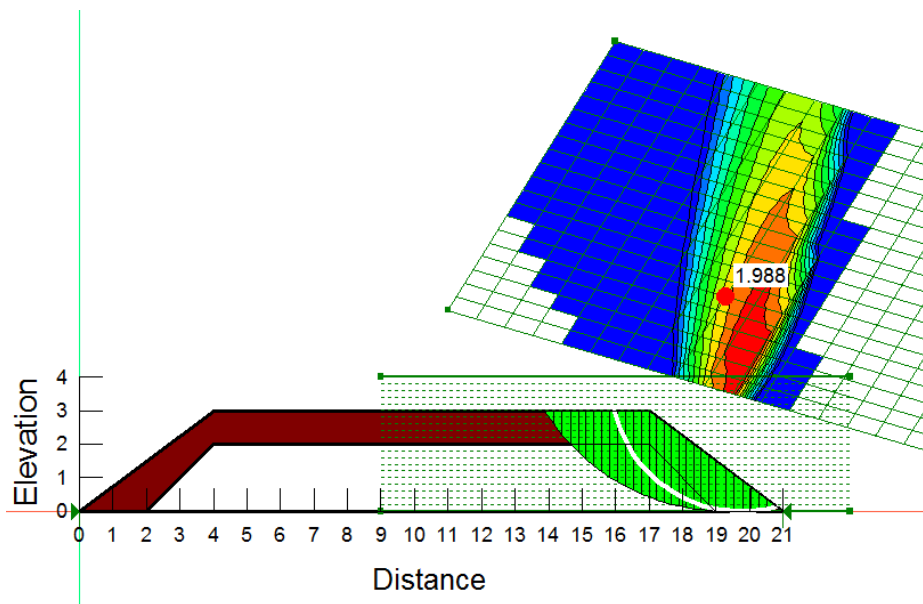


Ilustración 4.6 nuevo factor de seguridad

En este caso al seleccionar otra superficie de deslizamiento el factor de seguridad nos varía de 1.753 a 1.988.

2. Terraplén formado por arena y arena degradada.

En este segundo caso y siguiendo los pasos del punto 1 se obtienen los siguientes resultados:

En un primer análisis se obtiene un factor de seguridad = 1.380, como se puede apreciar en la siguiente ilustración.



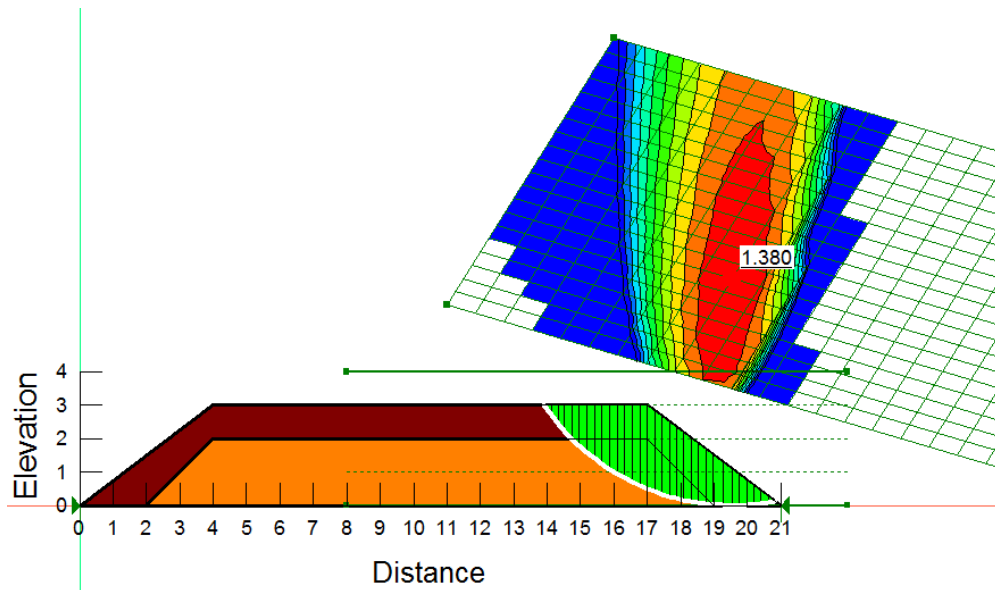


Ilustración 4.7 factor de seguridad

Escogiendo otra superficie de deslizamiento como en el apartado anterior se aprecia un nuevo factor de seguridad, es este caso sería,  $F. S = 1.674$ .

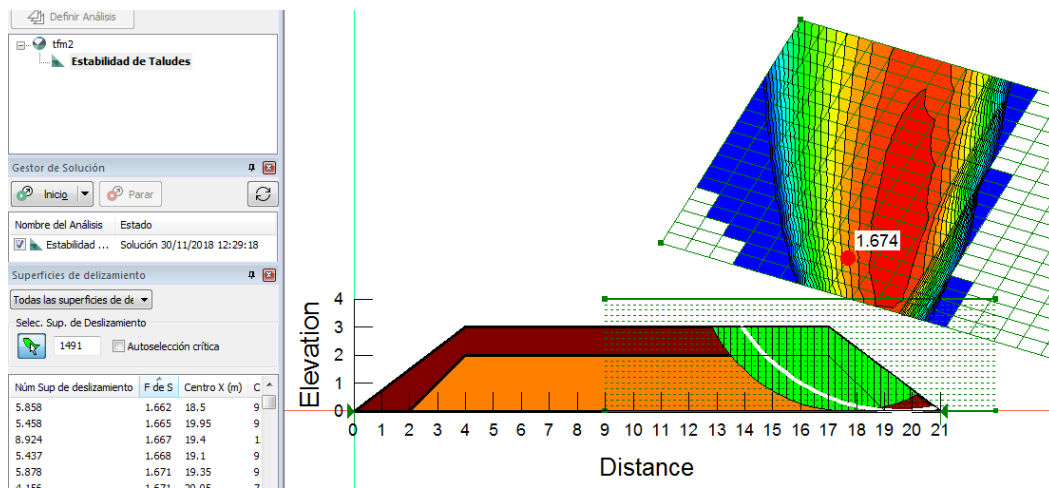


Ilustración 4.8 nuevo factor de seguridad

Como conclusión de este caso se puede decir que el terraplén que está formado por arena y EPS degradado tiene un comportamiento mejor al formado por arena y arena degradada.

#### 4.2 Caso 2: Embalse 1.

En este caso se va a estudiar el comportamiento que tiene el material EPS si se quiere usar como material principal para la construcción de un embalse.

Lo primero que hay que hacer es elegir la disposición que tendrá el EPS en el embalse, esto se puede ver en la (ilustración 4.9).

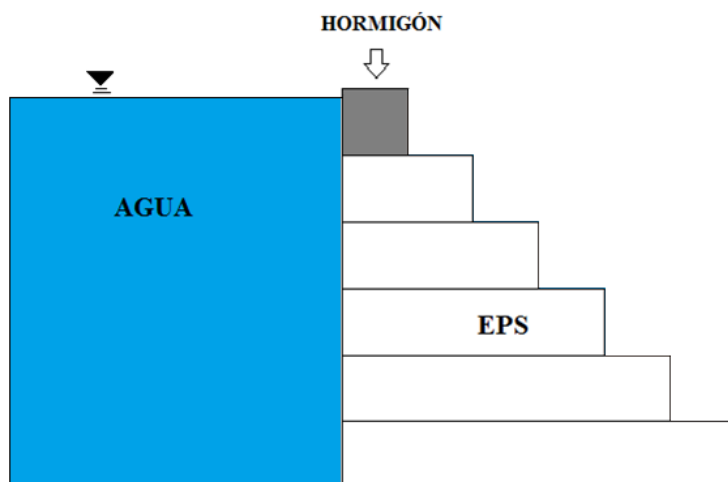


Ilustración 4.9 Embalse 1

Una vez obtenido esto se pasará a calcular los empujes que produce el agua sobre nuestro material, es este caso solo se dará un empuje horizontal del agua ya que no se encuentra agua por encima del material.

El empuje horizontal obtenido para cada lámina de EPS es el que se puede observar en la tabla 4.1.

Rebanadas EPS	Empuje Kn/m
1	1.22
2	3.67
3	6.13
4	85.83
5	110.36
6	134.88

Tabla 4.1 Empujes embalse 1

Una obtenidos los empujes se harán las siguientes suposiciones para la construcción del embalse:

- I. Encima del EPS se colocará una losa de hormigón de dimensiones: 0.5 m de largo, 0.5 m de alto y 1 m de profundidad. Esto se hace para ayudar a contrarrestar el empuje del agua ya que el EPS tiene un peso muy ligero.

- II. La primera rebanada de EPS tendrá unas dimensiones de: 1 m de largo, 0.5 m de alto y 1 m de profundidad. Esto hace que se dé un factor de seguridad de 1.69.
- III. El embalse tendrá una profundidad de 3 metros y cada rebanada de material tendrá una altura fija de 0.5m y profundidad de 1 m (ilustración 4.9).
- IV. Factor de seguridad = 1.2 para el resto de las rebanadas de EPS.
- V. Factor de rozamiento interno del EPS / fricción del EPS = 44°.

Con estas suposiciones y gracias a los empujes podremos obtener las longitudes necesarias de las demás rebanadas de materia para que se pueda realizar el embalse.

Rebanada	Material( Kn/m3)	Longitud (m)	Dimensiones(m)
1	Hormigón-25	0.5	0.5x0.5x1
2	EPS- 0.4	1	0.5x1x1
3	EPS- 0.4	5.83	0.5x5.83x1
4	EPS- 0.4	15.231	0.5x15.23x1
5	EPS- 0.4	15.232	0.5x15.23x1
6	EPS- 0.4	15.2321	0.5x15.23x1

Tabla 4.2 Dimensiones embalse

Como conclusión a este apartado se puede decir que la utilización de EPS para este caso en particular de embalse no es conveniente, ya que como se puede observar en la tabla 4.2 nos salen longitudes demasiado grandes para poder realizar el embalse.

Esto se debe a que el material EPS tiene un peso relativamente pequeño por lo que no puede soportar por si solo el empuje del agua.

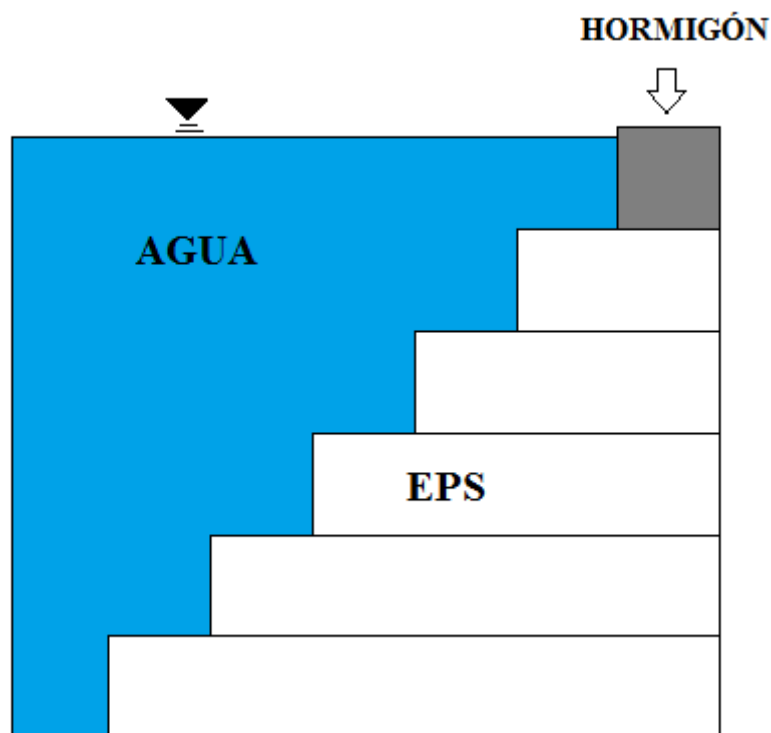
Una solución a esto sería aumentar el rozamiento entre rebanadas de EPS, esto podría hacerse encajando las rebanadas de EPS unas con otras a través de engranajes.

Otra solución posible sería poner peso encima de las rebanadas de EPS, por ejemplo, el peso producido por el agua, como se va a estudiar a continuación en el caso 3.

### 4.3 Caso 3: Embalse 2

Igual que en el caso anterior se va a estudiar el comportamiento que tiene el material EPS si se quiere usar como material principal para la construcción de un embalse.

En este caso se hará con una disposición distinta del material (ilustración 4.10), como se ha mencionado en el apartado anterior.



*Ilustración 4.10 Embalse 2*

Una vez está definida la forma que tiene el embalse se pasará a calcular los empujes que sufre nuestro material. En este caso el empuje horizontal es el mismo que en el apartado anterior, la diferencia es que ahora si se da un empuje vertical del agua.

Rebanadas EPS	Empuje Kn/m
1	1.22
2	3.67
3	6.13
4	85.83
5	110.36
6	134.88

*Tabla 4.3 Empujes embalse 2*

Una obtenidos los empujes se harán las siguientes suposiciones para la construcción del embalse:

- I. Encima del EPS se colocará una losa de hormigón de dimensiones: 0.5 m de largo, 0.5 m de alto y 1 m de profundidad. Esto se hace para ayudar a contrarrestar el empuje del agua ya que el EPS tiene un peso muy ligero.
- II. El embalse tendrá una profundidad de 3 metros y cada rebanada de material tendrá una altura fija de 0.5m y profundidad de 1 m (ilustración 4.9).
- III. Factor de rozamiento interno del EPS / fricción del EPS = 44°.
- IV. Factor de seguridad =1.2 para las rebanadas de EPS.

Con las suposiciones y a través de los empujes que produce el agua en las rebanadas de material se puede obtener la longitud de estas.

Rebanada	Material(Kn/m3)	Longitud (m)	Dimensiones(m)
1	Hormigón-25	0.5	0.5x0.5x1
2	EPS- 0.4	0.149	0.5x0.149x1

*Tabla 4.4 Dimensiones rebanadas 1 y 2*

Como se puede observar en la tabla 4.4 al calcular la longitud de la primera rebanada de EPS (rebanada2), nos da una longitud inferior a la primera rebanada del embalse, esto es debido a que para soportar el empuje horizontal producido por el agua es suficiente con el peso de la rebanada 1, la cual es de hormigón, por lo que supondremos una longitud de 1 metro para seguir con los cálculos.

Rebanada	Material(Kn/m3)	Longitud (m)	Dimensiones(m)
1	Hormigón-25	0.5	0.5x0.5x1
2	EPS- 0.4	1	0.5x1x1
3	EPS- 0.4	0.85	0.5x0.85x1

*Tabla 4.5 dimensiones rebanadas 1,2 y 3*

Al calcular la longitud de la rebanada 3 se obtiene el mismo problema que con la rebanada 2, nos da una longitud inferior a la rebanada anterior en este caso es debido al peso del agua sobre el EPS y el peso de la losa de hormigón.

Esto mismo sucederá en el resto de las rebanadas, por lo que se optará por darle unas dimensiones fijas a las rebanadas y calcular el factor de seguridad en cada una de ellas.

Rebanada	Material(Kn/m3)	Longitud (m)	Dimensiones(m)
1	Hormigón-25	0.5	0.5x0.5x1
2	EPS- 0.4	0.149 → 1	0.5x1x1
3	EPS- 0.4	0.85 → 1.5	0.5x1.5x1
4	EPS- 0.4	1.25 → 2	0.5x2x1
5	EPS- 0.4	1.57 → 2.5	0.5x2.5x1
6	EPS- 0.4	1.73 → 3	0.5x3x1

*Tabla 4.6 Dimensiones rebanadas*

Teniendo ya las dimensiones de las rebanadas (tabla4.6) se pasará a calcular su factor de seguridad.

Rebanada	Material(Kn/m3)	Factor seguridad
2	EPS- 0.4	2.33
3	EPS- 0.4	2.21
4	EPS- 0.4	2.45
5	EPS- 0.4	2.81
6	EPS- 0.4	3.22

*Tabla 4.6 Factor de seguridad*

Como se puede ver en la tabla 4.6 el factor de seguridad es muy alto, aunque un factor de seguridad normal de EPS en compresión es de 3.

Para intentar conseguir un factor de seguridad más bajo se seguirá otro criterio que se puede observar en la tabla4.7.

Rebanada	Material(Kn/m3)	Longitud (m)	Dimensiones(m)
1	Hormigón-25	0.5	0.5x0.5x1
2	EPS- 0.4	0.149 → 0.5	0.5x0.5x1
3	EPS- 0.4	0.61 → 1	0.5x1x1
4	EPS- 0.4	0.93 → 1	0.5x1x1
5	EPS- 0.4	1.04 → 1.5	0.5x1.5x1
6	EPS- 0.4	1.2 → 1.5	0.5x1.5x1

*Tabla 4.7 Nuevo criterio para rebanadas*

Con el nuevo criterio se obtienen las longitudes de rebanada que aparecen en la tabla 4.7 Y una vez obtenidas estas longitudes obtendremos el factor de seguridad de cada rebanada.

Rebanada	Material(Kn/m3)	Factor seguridad
2	EPS- 0.4	1.67
3	EPS- 0.4	1.8
4	EPS- 0.4	1.31
5	EPS- 0.4	1.9
6	EPS- 0.4	1.58

*Tabla 4.8 Nuevo factor de seguridad*

Una vez obtenidos todos los datos tendremos un diseño de embalse para este caso propuesto.

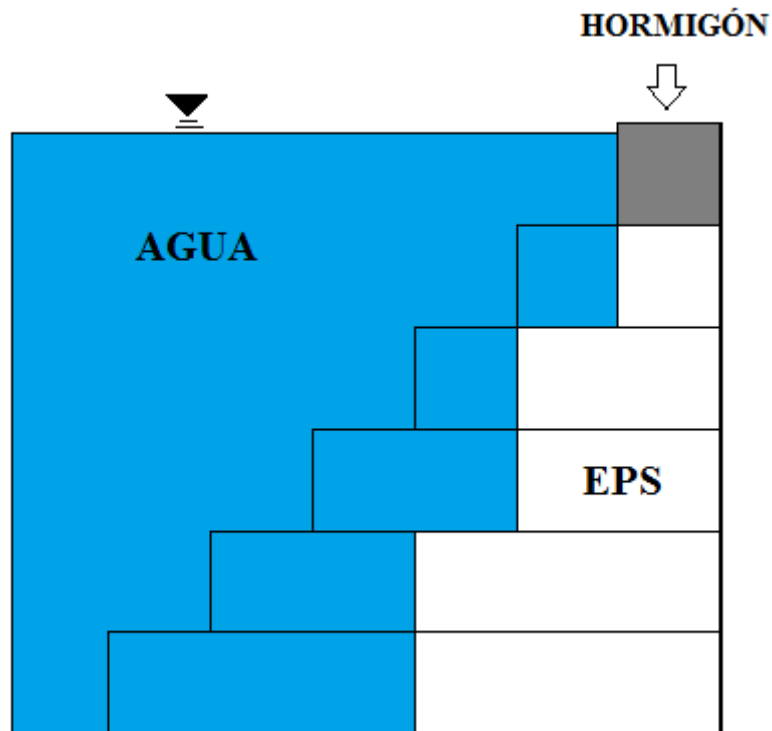


Ilustración 4.11 Nuevo diseño embalse 2

Una vez obtenidas las dimensiones de las rebanadas de material, quedaría comprobar si estas resisten a vuelco. Teniendo en cuenta que el embalse va a llevar una geomembrana como se muestra en la ilustración 4.12, se puede suponer que el material actuará como un “todo en uno” y que gracias al peso del agua que actúa sobre la geomembrana esta no permitirá que el material pueda volcar.

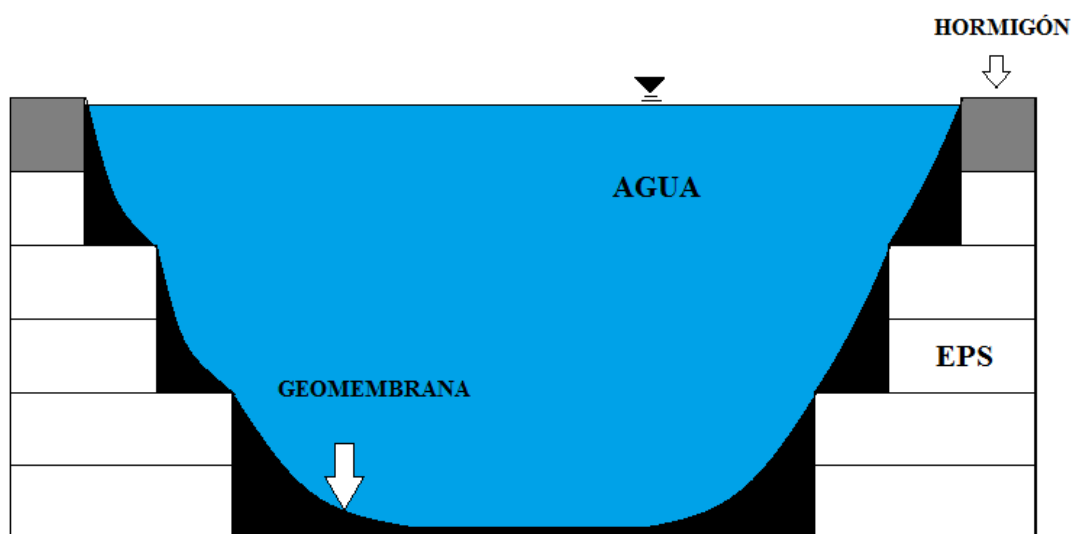


Ilustración 4.12 Embalse 2 con geomembrana



## 5 Conclusiones

El objetivo principal del presente trabajo se ha llevado a término mediante realización de ensayos y análisis de resultados de muestras de material EPS en máquina de corte directo, creación y resolución de casos donde podría aplicarse este material tanto de manera analítica, para el caso del embalse 1 y embalse 2, como con software GeoSlope 2018 para el análisis de un terraplén.

En cuanto a los resultados de los análisis del EPS en la máquina de corte directo comentar que como se ha explicado anteriormente las muestras de material con densidad 20kn/m<sup>3</sup> tienen una buena resistencia frente a tensiones bajas en el orden de 1 a 40 kPa, mientras que las muestras con densidades de 40 kg/m<sup>3</sup> soportan mejor como era de prever tensiones mucho mayores. Aunque es de destacar que aun soportando tensiones mayores que las muestras de material de densidad 20kn/m<sup>3</sup>, al llegar a tensiones superiores a 90 kPa no se pueden obtener resultados óptimos. En la siguiente tabla se resumen los resultados.

EPS 40 kg/m <sup>3</sup>					
Corte irregular		Corte regular		Desgranado	
Tensión normal (kPa)	Resistencia al corte (kPa)	Tensión normal (kPa)	Resistencia al corte (kPa)	Tensión normal (kPa)	Resistencia al corte (kPa)
6,94	38	6,94	27,2	6,94	33
20,8	54	20,8	57	20,8	37
41,6	83	41,6	75	41,6	51
97,2	92	97,2	108	97,2	89

EPS 20 kg/m <sup>3</sup>					
Corte irregular		Corte regular		Desgranado	
Tensión normal (kPa)	Resistencia al corte (kPa)	Tensión normal (kPa)	Resistencia al corte (kPa)	Tensión normal (kPa)	Resistencia al corte (kPa)
6,94	23,05	6,94	27,2	6,94	16,6
20,8	43	20,8	39,4	20,8	23,6
41,6	50	41,6	50	41,6	29
97,2	51,6	97,2	60	97,2	38

Para las muestras de  $20 \text{ kg/m}^3$  se ha obtenido una resistencia al corte que se puede observar en la tabla 5.1 y una fricción que oscila entre los  $20^\circ$  y  $23^\circ$ . Las muestras de  $40 \text{ kg/m}^3$  se ha obtenido una fricción que varía entre los  $38^\circ$  y  $44^\circ$ . Además de unas resistencias al corte que se observa en la tabla 5.2.

En cuanto al caso de estudio de un terraplén compuesto por EPS degradado (granulado) frente a arena degradada, el EPS se comporta mucho mejor que la arena obteniéndose un factor de seguridad de 1.75 frente al factor de seguridad de 1.38.

El estudio de la construcción de embalse con EPS se ha abordado desde dos metodologías diferentes:

- El caso 1 (en el cual el material EPS se encuentra fuera del agua), de acuerdo con los cálculos analíticos obtenidos nos da una geometría inviable.
- Para el caso 2 (en el cual el material EPS se encuentra sumergido en agua), la geometría si se considera válida y se obtiene un factor de seguridad alto.

El factor de seguridad varía entre 2.21 y 3.22, respectivamente.

La fricción utilizada ( $\phi = 44^\circ$ ) en este caso ha sido escogida fijándonos en las tensiones normales que soportaría en embalse.

## 6 Referencias

- GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis Ignacio. FERRER, Mercedes. ORTUÑO, Luis y OTEO, Carlos. Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educación, 2002. 744 p.
- BERRY, Peter L y REID, David. Mecánica de Suelos. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1993. 415 p.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. UNE 103401: Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo. Madrid, 1998. 33 p
- EPS Geofom Consortium. Disponible en: <http://www.civil.utah.edu> . Fecha de consulta 20 octubre de 2018.
- Statens vegvesen. VEGVESEN. Disponible en: <https://www.vegvesen.no> . Fecha de consulta 21 de octubre 2018
- Asociación nacional de poliestireno expandido. ANAPE. Disponible en: <http://www.anape.es> .Fecha de consulta 1 de noviembre de 2018.
- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3
- Geir, R. (Junio de 2011) The first EPS Geoblock Road Embankment. 1972. 4th International Conference on Geofom Blocks in Construction Applications EPS. Norway, Lillestrom, Noruega.
- Georgios, P., & Elias, S. (Junio de 2011). First time application of expanded polystyrene in highway projects in Greece. 4th International Conference on Geofom Blocks in Construction Applications EPS. Noruega.