

# TRABAJO FINAL DE MÁSTER



## TÍTULO

**Diseño de un experimento a gran escala para estudiar el efecto de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en laderas.**

## AUTOR

**Raül Oorthuis Gómez**

## TUTOR

**Antonio Lloret Morancho  
Jean Vaunat**

## ESPECIALIDAD

**Geotécnia**

## FECHA

**23/06/2016**



Dep. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica  
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA



## Índice

1.	Introducción.....	1
2.	Objetivos.....	2
3.	Caracterización del material .....	3
3.1	Toma de muestras .....	3
3.2	Identificación básica.....	5
3.2.1	Granulometría .....	5
3.2.2	Foto microscópica .....	9
3.2.3	Límites de Atterberg.....	10
3.2.4	Densidad de las partículas ( $\gamma_s$ ).....	15
3.2.5	Humedad natural ( $w_{nat}$ ).....	15
3.3	Propiedades hidráulicas.....	17
3.3.1	Curva de retención .....	17
3.3.2	Permeabilidad (K).....	30
3.4	Resistencia al corte directo: Ensayo corte directo CD .....	30
3.4.1	Equipo y método de ensayo.....	30
3.4.2	Cálculo y análisis de resultados muestra humedad natural.....	36
3.4.3	Cálculo y análisis de resultados muestra humedad natural.....	60
3.5	Ensayo Proctor .....	60
4.	Diseño terraplén experimental .....	61
4.1	Objetivos .....	61
4.2	Requisitos.....	61
4.3	Definición .....	62
5.	Modelación .....	64
5.1	Modelo.....	64
5.1.1	Condiciones de contorno y condiciones iniciales.....	64
5.2	Parámetros.....	64
5.3	Resultados.....	64
6.	Instrumentación.....	64
6.1	Perfiles verticales:.....	64
6.2	Datalogger.....	70
6.3	Estación meteorológica.....	70
6.4	Cámaras digitales + accesorios .....	71
6.5	Imágenes termales.....	71
6.6	Bomba de agua .....	71
6.7	Medidor caudal.....	71
7.	Conclusiones .....	71
	Referencias .....	72

## 1. Introducción

El calentamiento global y el cambio climático, en forma de subida del nivel del mar, cambios en el régimen de precipitación en todo el mundo, etc., son uno de los problemas importantes en la actualidad y generan numerosos deslizamientos en todo el mundo.

Un buen monitoreo de los cambios atmosféricos, junto al monitoreo de los cambios hidrológicos y la respuesta del talud pueden ayudar a una mejor comprensión de estas roturas y proponer medidas que eviten la pérdida de masa, o erosión de las laderas, siendo así más eficientes en el uso de recursos y materias primas.

Las precipitaciones, junto a la escorrentía y la interacción con la vegetación y la atmósfera son los parámetros que condicionan la infiltración en el suelo, las variables de respuesta en laderas. La infiltración de agua en taludes provoca un aumento de la humedad y una reducción de la resistencia a corte que puede generar el deslizamiento de una masa de suelo, o la reactivación de un deslizamiento pasado.

El cambio de humedad depende de la infiltración de agua en un suelo y es una fuente de mucha incertidumbre debido a la complejidad de la interacción entre la atmósfera, la vegetación y el suelo. La infiltración de agua en el suelo depende de muchos factores, entre ellos la intensidad y duración de las precipitaciones, las condiciones del suelo, la vegetación presente y de la propia geometría de la ladera o talud.

Al aumentar la humedad la resistencia a cortante y el factor de seguridad ante deslizamientos se reducen, tanto en condiciones saturadas como parcialmente saturadas. En condiciones saturadas, donde la presión del agua entre las partículas sólidas es positiva, se genera un aumento de esta y en consecuencia una tensión menor entre las partículas, generando en una reducción de su resistencia a rotura. En condiciones parcialmente saturadas, donde las presiones del agua son negativas, el aumento del contenido de humedad genera una reducción de la succión y la consecuente pérdida de resistencia a cortante.

Los deslizamientos superficiales reaccionan de una manera más predecible que los profundos, en los que la incertidumbre es mayor, y serán el objeto de estudio del presente trabajo.

El presente TFM forma parte del inicio de un proyecto nacional con una duración de 4 años llamado *SMuCPhy*, financiado por el “ministerio de Economía y Competividad del Gobierno de España” y coordinado por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la UPC Barcelona TECH. *SMuCPhy* proviene del nombre del proyecto en inglés “*Slope mass-wasting under climate change. Physical mechanisms, predictive modelling and possible mitigation strategies*”, que en castellano equivaldría a “*Pérdida de suelos en laderas bajo cambio climático. Procesos físicos, modelización predictiva i posibles estrategias de mitigación*”.

Este TFM trata sobre el diseño de un experimento a gran escala, de 14x10x3 metros, para estudiar el efecto de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en laderas. Para el diseño del talud experimental y la correcta elección de los sensores y su lugar de instalación, así como la elección de la pendiente necesaria para que se produzcan pequeñas roturas y poder monitorizarlas, será necesario una caracterización previa del material en laboratorio, así como el desarrollo de un modelo numérico acoplado para predecir la respuesta de la maqueta.

Los principales beneficios naturales y socio-económicos esperados con la realización de este proyecto son la reducción del riesgo de erosión de suelos agrícolas o forestales y la reducción de los impactos indirectos que ocasionan, como daños a infraestructuras, disminución de la capacidad de embalses, etc. y el fomento del uso de la vegetación para diseñar soluciones ingenieriles sostenibles.

## 2. Objetivos

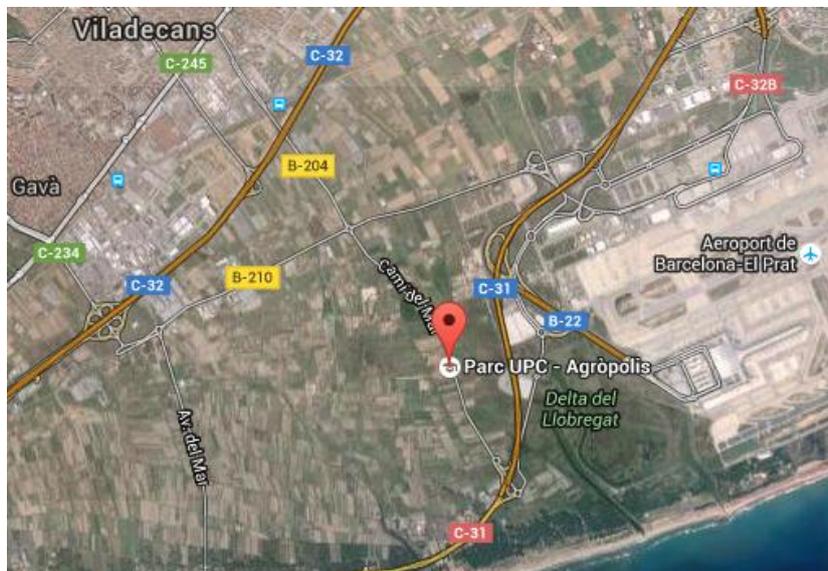
- Elección de la ubicación del terraplén experimental con el propósito de construirlo a partir de octubre del 2016.
- Caracterizar en laboratorio, mecánica e hidrológicamente, el suelo a usar en la construcción del terraplén.
- Comprender y modelar numéricamente los mecanismos que actúan en la generación de deslizamientos superficiales y la consecuente erosión en laderas.
- Comprender la interacción suelo-vegetación-atmósfera ante acciones climáticas naturales o infiltraciones artificiales, tanto en condiciones saturadas como parcialmente saturadas.
- Diseñar un talud experimental a gran escala con el objeto de proporcionar mediciones de calidad en condiciones controladas sobre los procesos térmicos e hidrológicos de la interfaz suelo-vegetación-atmósfera y su acoplamiento con los efectos mecánicos.
- Elección de los sensores y su posicionamiento en el talud, así como la vegetación de una de las caras del talud.
- Presentar estrategias de mitigación de la erosión a consecuencia de cambios climáticos.

### 3. Caracterización del material

#### 3.1 Toma de muestras

Las muestras de suelo a caracterizar en laboratorio han sido tomadas en el suelo que se utilizará para la construcción de la duna experimental, cerca del lugar donde se prevé su construcción, en el *Parc UPC Agròpolis*.

El *Parc UPC Agròpolis* es un espacio destinado a ubicar proyectos e investigaciones de la UPC y proyectos de universidad-empresa. Está situado en el Delta del Llobregat, muy cercano al aeropuerto, y en el término municipal de Viladecans, tal y como se muestra en la Figura 1.



*Figura 1: Localización Parque UPC Agrópolis.*

En la Figura 2 se observa el punto de extracción de muestras y el emplazamiento del futuro terraplén experimental, a escasos metros entre sí.



*Figura 2: Lugar de toma de muestras y del futuro emplazamiento del terraplén experimental.*



*Figura 3: Lugar emplazamiento futuro terraplén experimental.*

En la Tabla 1 se recogen las coordenadas *UTM* del lugar de toma de muestras y del futuro emplazamiento del terraplén experimental.

<b>Coordenadas <i>UTM</i></b>		
	<b>X</b>	<b>Y</b>
Toma de muestras	41.289087	2.042825
Terraplén experimental	41.288492	2.043570

*Tabla 1: Coordenadas *UTM* del lugar de la toma de muestras y del futuro emplazamiento del terraplén experimental.*

## 3.2 Identificación básica

### 3.2.1 Granulometría

Con el objeto de determinar cuantitativamente la distribución del tamaño de las partículas de suelo se ha realizado en ensayo granulométrico por tamizado según la norma *UNE 103101:1995*. Ésta norma sirve para determinar el porcentaje de suelo que pasa por los distintos tamices de la serie empleada hasta el tamiz nº200 (abertura de 0,075 mm). La fracción que pasa por el tamiz nº 200 corresponde con limos y arcillas.

#### 3.2.1.1 Equipo y herramientas:

- Balanza con precisión de 0,01 gramos.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable (110o ±5o C).
- Mazo de goma y cubeta de goma.
- Bandejas.
- Cepillo y brocha para limpiar tamices.
- Serie de tamices según Tabla 2.

Nº deTamiz (ASTM)	Abertura (mm)
4	4,76
10	2
20	0,85
40	0,425
60	0,25
100	0,15
200	0,075

Tabla 2: Abertura y designación tamices ASTM.

#### 3.2.1.2 Método: granulometría por tamizado.

- Preparación de la muestra:
  - Separar aproximadamente 500 gramos de la muestra tomada en campo y secarla al horno.

- Desmenuzar el material en una cubeta de goma con un mazo de goma, evitando así la destrucción de las partículas más gruesas, ver Figura 4.



*Figura 4: Desmenuzar material con cubeta y mazo de goma.*

- Procedimiento:
  - Cribar el material por el tamiz nº 10.
  - Pesar material retenido por tamiz nº 10 (tamaño partículas > 2mm) y el que ha pasado.
  - Poner el material retenido en una bandeja, y el material que ha pasado en otra bandeja.
  - Añadir agua a cada bandeja y dejar remojar el material durante 24 horas.
    - **Para parte retenida (>2mm):**
      - Poner la parte retenida encima columna de tamices formada por el tamiz nº 40 (abertura 0,425mm) en la parte superior, y el nº200 (abertura 0,074mm) en la inferior.
      - Lavar finos: lavar material dispuesto sobre columna tamices debajo del grifo, evitando que el material rebose por arriba, hasta que el agua salga limpia.
      - Poner material en bandeja y secarlo durante 24 horas en el horno.
      - Pesar material seco
    - **Para parte no retenida ( $\leq 2\text{mm}$ )**
      - Poner parte no retenida encima el tamiz nº 200 (abertura 0,074mm)

- Lavar finos: lavar material dispuesto sobre el tamiz nº 200 debajo del grifo, evitando que el material rebose por arriba, hasta que el agua salga limpia.
  - Poner material en bandeja y secarlo durante 24 horas en el horno.
  - Pesar material seco
- Armar la columna de tamices (Figura 5) y tamizar los suelos lavados, pesando el suelo retenido en cada uno de los tamices. Conocido el peso retenido en cada tamiz, se calcula el porcentaje de partículas de diámetro inferior al de cada tamiz.



- *Figura 5: Columna de tamices usada para la obtención de la curva granulométrica.*

- Representar gráficamente los resultados obteniendo la curva granulométrica.

### ***3.2.1.3 Resultados: Obtención de la curva granulométrica***

En la Tabla 3 y Figura 6 se presentan los resultados obtenidos tras el ensayo granulométrico de la fracción de partículas superiores a 0,074mm junto a la curva granulométrica obtenida.



### 3.2.1.4 Análisis

El porcentaje de finos que pasa por el tamiz nº200 es del 62% y corresponde a un suelo de grano fino. Un 37% de la muestra está comprendida por partículas superiores a 0,074mm e inferiores a 2mm, es decir a arenas. El índice líquido y plástico es de aproximadamente 25 y 18 respectivamente, con un índice de plasticidad (7) bajo. Con el gráfico de clasificación de suelos finos propuesto por *Casagrande*, ver Figura 7, obtenemos una clasificación de suelo ML.

La clasificación ML corresponde a limos inorgánicos y arenas muy finas.

Línea A :  $IP = 0,73 \cdot (w_l - 20)$

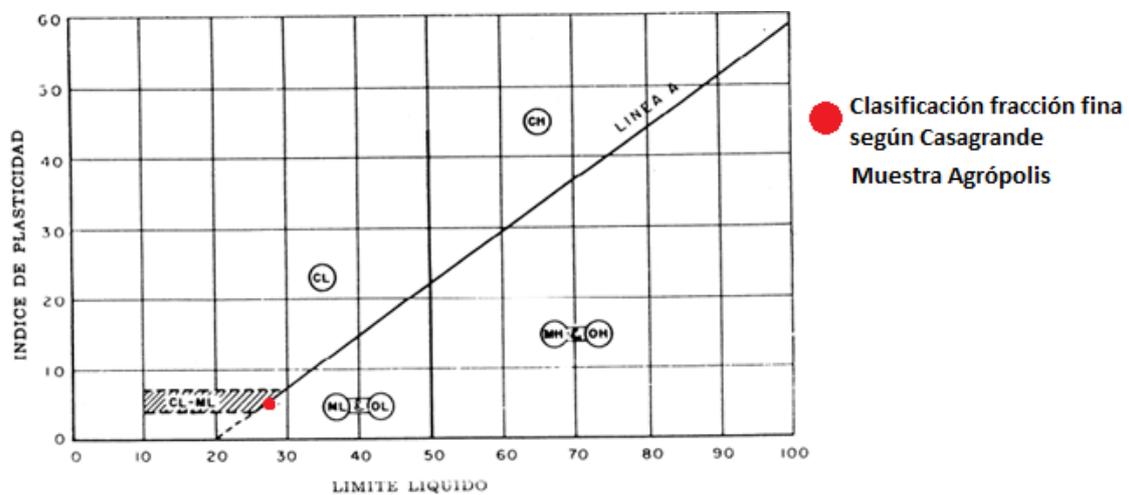


Figura 7: Clasificación del suelo fino según Casagrande. Fuente: Apuntes mecánica de suelo Máster Ingeniería del Terreno UPC.

### 3.2.2 Foto microscópica

En la Figura 8 se muestra una foto microscópica de una muestra de suelo.

Figura 8: Foto microscópica de una muestra de suelo del Parc UPC Agrópolis.

### 3.2.3 Límites de Atterberg

En función de su humedad, un suelo puede tener diferentes consistencias. La consistencia de un suelo es su resistencia a ser deformado o moldeado. Albert Atterberg definió a principios del siglo XX cuatro estados de consistencia para los suelos (líquido, plástico, semisólido y sólido):

- Estado líquido: suelo sin apenas consistencia, comportamiento de fluido.
- Estado plástico: suelo moldeable con una ligera resistencia al corte.
- Estado semisólido: Resistencia al corte considerable. Se agrieta al reducir su humedad.
- Estado sólido: Resistencia al corte notable.

A los valores de la humedad que separan estos estados se les denomina límites de Atterberg y son característicos de cada suelo:

- Límite líquido ( $\omega_L$ ): humedad frontera entre el estado líquido y plástico.
- Límite plástico ( $\omega_P$ ): humedad frontera entre el estado plástico y el semisólido.
- Límite de retracción ( $\omega_R$ ): humedad frontera entre el estado semisólido y sólido.

En la Figura 9 se representan los diferentes estados del suelo en función de su humedad y los límites de Atterberg.

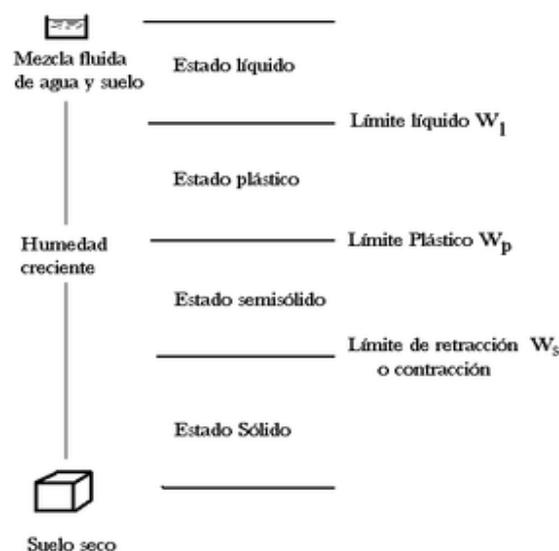


Figura 9: Estados del suelo y límites de Atterberg. Fuente: UPC, Apuntes Máster en Ingeniería del Terreno)

Los límites de Atterberg pertenecen, junto a los análisis granulométricos, a los ensayos de identificación de suelos. A diferencia de los ensayos granulométricos, que nos permiten conocer cuantitativamente las partículas finas, los límites de Atterberg nos permiten conocer cualitativamente el comportamiento de la fracción fina, motivo por el que son de mucha utilidad en geotecnia.

Estos valores se obtienen de forma experimental en laboratorio y son característicos de cada suelo. Valores elevados del límite líquido están relacionados con una deformabilidad o compresibilidad elevadas. Para la obtención del límite líquido y plástico se sigue la norma *UNE-103103-1994* y *UNE-103104-1993* respectivamente.

### **3.2.3.1 Determinación límite líquido ( $\omega_L$ ): UNE-103103-1994**

Consiste en determinar la humedad a la que un surco en un suelo situado sobre una zona esférica (cuchara de Casagrande) se cierra en una longitud dada (12,5mm) cuando se dan 25 golpes sobre la base de la cuchara.

- Equipo y herramientas:
  - Muestra de suelo.
  - Espátula
  - Equipo cuchara Casagrande (Figura 10)
  - Acanalador normalizado para hacer el surco (Figura 11)
  - Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable ( $110 \pm 5^\circ$  C).
  - Guantes



*Figura 10: Cuchara de Casagrande para la determinación del límite líquido.*



*Figura 11: Acanalador normalizado para hacer el surco.*

- Procedimiento:
  - Secar material en horno y desmenuzarlo con ayuda de una cubeta de goma y una maza de goma.
  - Tamizar el material desmenuzado y reservar la fracción que pasa tamiz nº40 (0,425mm).
  - Añadir agua poco a poco y mezclar con la espátula hasta que quede una masa homogénea.
  - Poner una fracción del suelo amasado en la cuchara de Casagrande, enrasando y evitando coqueas de aire.
  - Hacer un surco en el material, tocando el fondo de la cuchara de Casagrande.
  - Girar la manivela del equipo y contar los golpes hasta el cierre del surco en una longitud aproximada de 12mm. Apuntar el nº de golpes (entre 25 y 40) y retirar una pequeña muestra cercana al surco cerrado, obteniendo posteriormente su humedad tras secarla en el horno.
  - Añadir un poco más de agua al suelo tamizado y humedecido anteriormente, contar los golpes necesarios para que se cierre el surco y determinar posteriormente su humedad en el horno.
  - Añadir un poco más de agua a la mezcla de suelo húmeda, repitiendo el proceso (nº golpes entre 12 y 25) y obteniendo su humedad posterior mediante secado en horno.
  - Una vez determinado el nº de golpes necesarios para cerrar el surco con tres humedades diferentes, se obtiene la humedad para el cierre del surco en 25 golpes exactos, que corresponde con la humedad del límite líquido. Para ello se llevan los resultados del ensayo a un gráfico de doble escala logarítmica en el que se representa en abscisas el número de golpes y en ordenadas la humedad en tanto por ciento, trazando una recta con pendiente -0,117 que equidiste de los 3 puntos obtenidos. La humedad del punto de la recta

corresponde a la abscisa de los 25 golpes, que es la humedad del límite líquido.

- Cálculo del límite líquido:

En la Figura 12 se observa la obtención del límite líquido a partir del nº de golpes necesario para cerrar un surco para diferentes humedades.

*Figura 12: Obtención del límite líquido a partir del nº de golpes necesarios para cerrar el surco.*

### **3.2.3.2 Determinación límite plástico ( $\omega_p$ )**

Consiste en determinar la humedad a la que aparecen fisuras en el suelo cuando se hace rodar entre la mano y una superficie plana y lisa formando un cilindro de unos 3 milímetros de diámetro.

- Equipo y herramientas:
  - Muestra de suelo.
  - Espátula
  - Papel film
  - Baldosa de cristal
  - Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable (110o  $\pm$ 5o C).
  - Guantes
  - Recipiente hermético
- Procedimiento:
  - Secar material en horno y desmenuzarlo con ayuda de una cubeta de goma y una maza de goma.
  - Tamizar el material desmenuzado y reservar la fracción que pasa tamiz nº40 (0,425mm).
  - Poner un poco de agua procurando que quede una mezcla con cierta plasticidad.

- Envolver en papel film el material humedecido y esperar 24 horas.
  - Hacer 3 elipsoides pequeños (unos 8 gramos cada uno) con el material y rodarlos entre la mano y la superficie rugosa de la baldosa de cristal por separado, formando unos cilindros de unos 3 milímetros. Los cilindros que se formen deben agrietarse longitudinalmente al llegar a los 3 milímetros de espesor. En caso de que se rompa antes de llegar a los 3 milímetros de grosor se deberá añadir un poco de agua.
  - A medida que se obtienen los cilindros se guardan en un bote hermético para evitar el cambio de humedad por interacción con la atmósfera.
  - Determinar el promedio de la humedad que tienen los 3 cilindros, obteniendo el valor de la humedad promedio correspondiente al límite plástico.
- Cálculo del límite plástico:

<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>	
<b>Número cilindros</b>	3
<b>Fecha ensayo</b>	
<b>Peso recipiente (g)</b>	
<b>Peso recipiente + cilindros húmedos (g)</b>	
<b>Peso recipiente + cilindros secos (g)</b>	
<b>Humedad promedio límite plástico (%)</b>	

*Tabla 4: Resultado humedad correspondiente al límite plástico.*

### **3.2.3.3 Determinación Índice de plasticidad (IP):**

El índice de plasticidad (*IP*) es intrínseco de cada suelo y aporta información sobre el incremento de humedad necesario para pasar del estado semisólido al líquido. Se define según la ecuación (1)

$$IP = \omega_L - \omega_P \quad (1)$$

Dónde:

$\omega_L$ : Límite líquido =

$\omega_P$ : Límite plástico =

### **3.2.3.4 Análisis resultados**

### 3.2.4 Densidad de las partículas ( $\rho_s$ )

Es el peso específico de las partículas que forman el esqueleto del suelo y su valor depende de los minerales que forman las partículas del suelo. Dada su escasa variabilidad, su valor se suele aproximar a  $2,7 \text{ g/cm}^3$ .

Para determinar el peso específico de las partículas sólidas en laboratorio se ha hecho uso del método del picnómetro (norma *UNE 103302-1994*), detallado a continuación.

#### 3.2.4.1 *Equipo y herramientas:*

- Muestra de suelo
- Balanza con precisión de 0,01 gramos.
- Picnómetro

#### 3.2.4.2 *Método del picnómetro*

#### 3.2.4.3 *Cálculo y análisis resultado*

Una vez determinado el volumen de las partículas sólidas ( $V_s$ ) con el picnómetro, y conociendo el peso seco ( $W_s$ ) de la muestra introducida, se obtiene el peso específico de las partículas sólidas.

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} = 2,7 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

### 3.2.5 Humedad natural ( $w_{\text{nat}}$ )

La humedad ( $\omega$ ) de un suelo se expresa como la relación en porcentaje entre el peso de agua existente en una masa de suelo y el peso de las partículas sólidas.

$$\omega (\%) = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100$$

Dónde:

$\omega$  : Humedad en %

$W_w$ : Peso de agua en masa de suelo

$W_s$ : Peso de las partículas sólidas

El contenido de humedad de una masa de suelo es la suma del agua libre, el agua capilar y el agua higroscópica del suelo, y es un parámetro muy importante, junto con el contenido de aire, para predecir el comportamiento del suelo.

Para determinar la humedad en laboratorio se ha usado el método de secado a horno (UNE 103300-1993). Este ensayo tiene por finalidad determinar el contenido de humedad de una muestra de suelo recogida en el Parque UPC Agrópolis. La descripción del equipo, procedimiento y resultados se detallan a continuación.

### **3.2.5.1 Equipo y herramientas:**

- Muestra de suelo.
- Balanza con precisión de 0,01 gramos.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable (110o ±5o C).
- Guantes, espátula, recipiente metal.

### **3.2.5.2 Método secado en horno**

- Se toma una muestra representativa de suelo con una espátula. La muestra de suelo tomada estará previamente precintada y guardada en la cámara húmeda para evitar pérdidas o absorción de humedad. Dado el pequeño tamaño de las partículas será suficiente una pequeña muestra, de 10 a 100 gramos.
- Tarar recipiente a poner en el horno (Peso Tara).
- Colocar la muestra húmeda en el recipiente y pesarlo (Peso Tara+Suelo húmedo).
- Colocar el conjunto en el horno, transcurridos 24 horas sacar el recipiente con la muestra seca (Peso Tara+Suelo seco) y pesar el conjunto lo más rápido posible, evitando así la absorción de la humedad atmosférica.
- 

### **3.2.5.3 Cálculo y análisis de resultados**

$$\omega (\%) = \frac{(\text{Peso Tara} + \text{Suelo húmedo}) - (\text{Peso Tara} + \text{Suelo seco})}{(\text{Peso Tara} + \text{Suelo seco}) - (\text{Peso Tara})} \cdot 100$$

### MÉTODO SECADO AL HORNO

Muestra número	1	2	3
Fecha toma muestra	17/03/2016	17/03/2016	17/03/2016
Fecha ensayo	17/03/2016	01/04/2016	07/04/2016
Peso recipiente (Tara)	63,39	174,95	191,1
Peso recipiente + suelo húmedo	151,51	517,3	326,5
Peso recipiente + suelo seco	137,39	457,96	302,57
Contenido de humedad (%)	19,1	21,0	21,5
Humedad natural promedio (%)	20,5		

Tabla 5: Resultados determinación humedad natural (%).

La humedad promedio del suelo tomado en Agrópolis es del 20,5%.

## 3.3 Propiedades hidráulicas

### 3.3.1 Curva de retención

Para analizar el comportamiento mecánico de los suelos no saturados hay que tener en cuenta que no se cumple la ley de tensiones efectivas propuesta por *Terzaghi, 1925* (2):

$$\sigma' = \sigma - P_w \quad (2)$$

Un suelo parcialmente saturado tiene una mayor resistencia que uno totalmente saturado o seco. Esto se debe a la ascensión capilar del líquido a través de los intersticios del suelo, que genera una presión intersticial negativa. Esta ascensión capilar ejerce una tracción entre las partículas sólidas que proporciona una resistencia adicional que se anula al saturar el suelo.

La expresión más conocida para calcular la tensión efectiva actuante sobre las partículas en un medio no saturado es la de *Bishop, 1963* (3).

$$\sigma' = \sigma - [P_a - \chi (P_a - P_w)] \quad (3)$$

Dónde:

$\sigma$  : tensión efectiva

$P_a$  : Presión del aire.

$P_w$  : Presión del agua.

$\chi$ : Parámetro de Bishop

$S = P_a - P_w = \text{Succión}$

Tal como se observa en la Ecuación (3), Bishop incorpora una variable tensional llamada succión ( $S$ ) con el fin de analizar el comportamiento mecánico de los suelos no saturados. El parámetro  $X$  tiene un valor comprendido entre  $[0 - 1]$  en función del grado de saturación del suelo, para suelo secos tiene un valor de 0 y para saturados un valor de 1.

La curva de retención se obtiene con el objeto de conocer la succión del suelo en función de su grado de saturación o humedad. A continuación se detalla el equipo y el método experimental seguido en laboratorio para su obtención.

### **3.3.1.1** *Equipo y herramientas*

Para obtener la curva de retención se ha hecho uso del siguiente equipo y herramientas:

- Tensiómetro electrónico de laboratorio: lecturas del potencial del agua.
- Datalogger: recogida de datos
- Recipiente para introducir la muestra
- Balanza con precisión de 0,01 gramos.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable ( $110 \pm 5$  C).
- Guantes, espátula, recipiente metal.

Con ayuda del tensiómetro se mide el potencial del agua en el suelo ( $s$ ), cuyas lecturas son recogidas por el *datalogger* para su posterior análisis. Una vez tomadas las lecturas se obtiene la humedad de la muestra con el método del secado en horno. Posteriormente, y conociendo la densidad de las partículas y el índice de poros de la muestra se obtiene el grado de saturación.

El tensiómetro de laboratorio utilizado es el T5x de la empresa alemana UMS (Figura 13), con un rango de lectura del potencial del agua comprendido entre los +100 y los -160 kPa. Estas lecturas se realizan con un transductor de presión con compensación automática de la presión atmosférica.



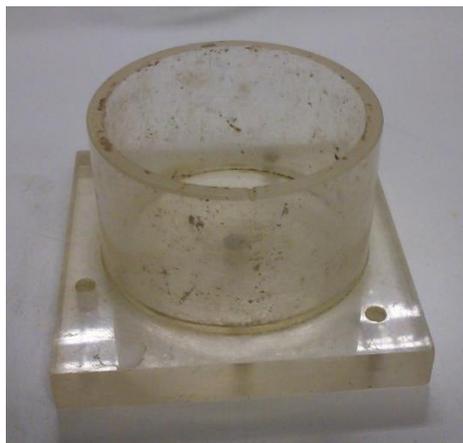
*Figura 13: Tensiómetro de laboratorio UMS-T5x. Fuente: ums-muc.de*

El *datalogger* utilizado ha sido el INFIELD7 (Figura 14), de la misma empresa (UMS) que el tensiómetro. Permite leer las lecturas a tiempo real.



*Figura 14: Datalogger UMS-INFIELD7 usado para la recogida de lecturas a tiempo real. Fuente: ums-muc.de*

El recipiente o molde usado para introducir la muestra y compactarla hasta la densidad requerida ( $1,6 \text{ g/cm}^3$ ) se muestra en la Figura 15.



*Figura 15 : Recipiente para la introducción de la muestra parcialmente saturada.*

### 3.3.1.2 Método

- Obtener el peso de suelo seco ( $W_s$ ) necesario para llenar el recipiente a la densidad seca requerida (1,6 g/cm<sup>3</sup>).
- Añadir el agua necesaria ( $W_a$ ) para obtener la humedad deseada, evitando llegar a la humedad de saturación de la muestra.
- Compactar la muestra:
- Introducir la muestra parcialmente saturada dentro del recipiente circular en capas de espesor pequeño, compactando cada capa por igual hasta obtener una densidad seca de 1,6 g/cm<sup>3</sup>.
- Sellar el recipiente y dejarlo durante 24 horas en la cámara húmeda para conseguir una distribución de la humedad lo más homogénea posible.
- Verificar que el tensiómetro está completamente saturado con ayuda del manual del tensiómetro. En caso contrario serán necesarias unas 12 horas más para saturarlo correctamente, evitando cualquier burbuja de aire en su interior.
- Pasadas 24 horas del sellado de la muestra, hacer un pequeño agujero en la capa de sellado e introducir una barrena del diámetro del eje del tensiómetro hasta la mitad de la muestra.
- Conectar el tensiómetro al *datalogger*.
- Punzar con cuidado el tensiómetro hasta que la piedra cerámica porosa, situada en el extremo inferior del tensiómetro, llegue hasta el fondo del agujero y entre en contacto con la muestra de suelo. Se deben controlar las lecturas del tensiómetro durante la inserción del tensiómetro para que no superen los 300 kPa, tensión a la que se destruye el transductor de presión. Detener la inserción o bajar la velocidad de inserción para permitir la liberación de tensiones.
- Anotar las lecturas del *datalogger* para su posterior análisis.
- Obtener la humedad de la muestra con el método del secado al horno (apartado 3.2.5)
- Obtener el grado de saturación en función la humedad, del índice de poros y la densidad de las partículas sólidas obtenida anteriormente en laboratorio (apartado 3.2.4).

$$S_r = \frac{\omega \cdot \rho_s}{e}$$
$$e = \frac{(h_{muestra} - h_{sólidos})}{h_{sólidos}}$$

$$h_{sólidos} = \frac{V_{sólidos}}{\text{Área}} = \frac{W_{sólidos}}{\rho_s \cdot \text{Área}}$$

- Repetir el procedimiento con diferentes humedades, obteniendo su grado de saturación y la lectura de succión del tensiómetro para cada uno de ellos.
- Graficar la succión obtenida para diferentes grados de saturación.
- Obtener la curva de retención a partir de la aproximación de *Van Genuchten (1980)*.

### 3.3.1.3 Resultados

En las siguientes tablas y figuras se muestran los resultados de las succiones medidas con el tensiómetro en 6 muestras con grados de saturación distintos.

Muestra nº	1
Fecha	07/04/2016
Observaciones	Succión medida en muestra ensayada en equipo de corte
Diámetro muestra (cm)	5,99
Altura muestra (cm)	2,93
Volumen muestra (cm <sup>3</sup> )	82,64
Peso muestra seca (g)	113,81
γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,38
Altura partículas (cm)	1,50
Índice poros	0,96
Tara (g)	191,10
T+S+A (g)	326,50
T+S (g)	302,83
Humedad (%)	20,00
Grado saturación (%)	56,22
Succión (kPa)	27,00

Tabla 6: Resultado succión  $S_r = 0,56$ .

<b>Muestra nº</b>	<b>2</b>
<b>Fecha</b>	25/04/2016
<b>Observaciones</b>	Humedad no medida tras ensayo
<b>Diámetro recipiente (cm)</b>	3,83
<b>Altura recipiente (cm)</b>	7,63
<b>Volumen recipiente (cm<sup>3</sup>)</b>	87,90
<b>Altura muestra (cm)</b>	7,63
<b>Volumen muestra (cm<sup>3</sup>)</b>	87,90
<b>Peso muestra seca (g)</b>	140,64
<b><math>\gamma_d</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,60
<b>Altura partículas (cm)</b>	4,52
<b>Índice poros</b>	0,69
<b>Peso agua añadida (g)</b>	4,33
<b>Humedad (%)</b>	3,08
<b>Grado saturación (%)</b>	12,09
<b>Succión (kPa)</b>	87,00

Tabla 7: Resultado succión  $S_r = 0,12$  .

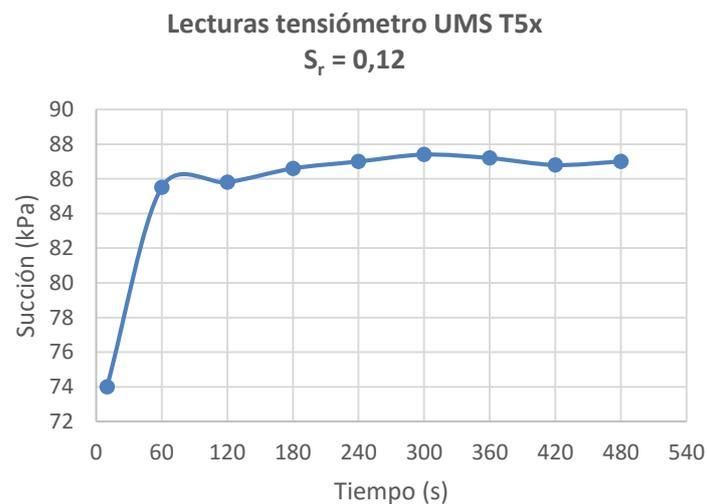


Figura 16: Lecturas tensiómetro muestra 2,  $S_r = 0,12$  .

<b>Muestra nº</b>	<b>3</b>
<b>Fecha</b>	27/04/2016
<b>Observaciones</b>	
<b>Diámetro recipiente (cm)</b>	3,83
<b>Altura recipiente (cm)</b>	7,63
<b>Volumen recipiente (cm<sup>3</sup>)</b>	87,90
<b>Altura muestra (cm)</b>	7,63
<b>Volumen muestra (cm<sup>3</sup>)</b>	87,90
<b>Peso muestra seca (g)</b>	140,60
<b><math>\gamma_d</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,60
<b>Altura partículas (cm)</b>	4,52
<b>Índice poros</b>	0,69
<b>Tara (g)</b>	97,34
<b>T+S+A (g)</b>	173,17
<b>T+S (g)</b>	169,04
<b>Humedad (%)</b>	5,76
<b>Grado saturación (%)</b>	22,60
<b>Succión (kPa)</b>	100,00

Tabla 8: Resultado succión  $S_r = 0,22$  .

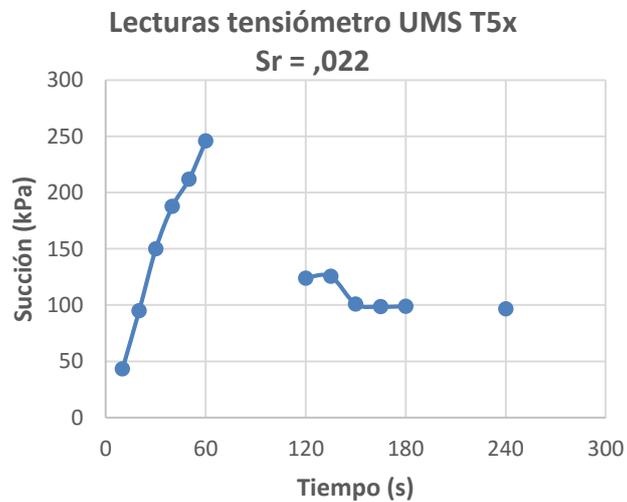
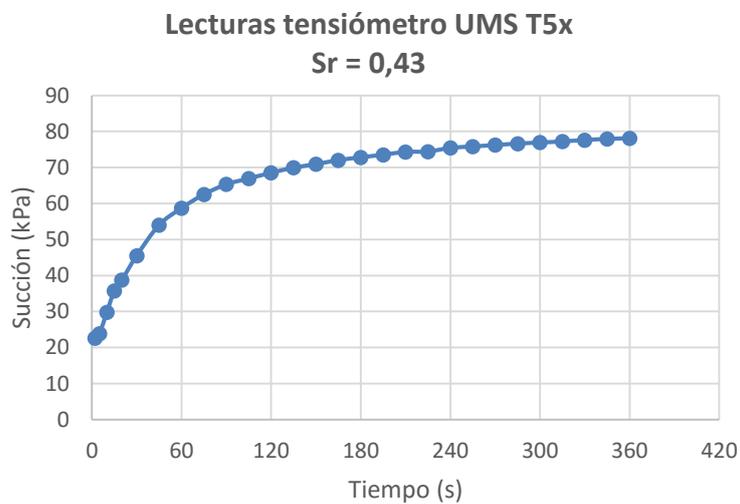


Figura 17: Lecturas tensiómetro muestra 3,  $S_r = 0,22$  .

<b>Muestra nº</b>	<b>4</b>
<b>Fecha</b>	07/06/2016
<b>Observaciones</b>	
<b>Diámetro recipiente (cm)</b>	7,00
<b>Altura recipiente (cm)</b>	4,54
<b>Volumen recipiente (cm<sup>3</sup>)</b>	174,82
<b>Altura muestra (cm)</b>	4,54
<b>Volumen muestra (cm<sup>3</sup>)</b>	174,82
<b>Peso muestra seca (g)</b>	279,71
<b><math>\gamma_d</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,60
<b>Altura partículas (cm)</b>	2,69
<b>Índice poros</b>	0,69
<b>Tara (g)</b>	52,28
<b>T+S+A (g)</b>	106,58
<b>T+S (g)</b>	101,16
<b>Humedad (%)</b>	11,09
<b>Grado saturación (%)</b>	43,55
<b>Succión (kPa)</b>	80,00

*Tabla 9: Resultado succión  $S_r = 0,43$  .*



*Figura 18: Lecturas tensiómetro muestra 4,  $S_r = 0,43$  .*

Muestra nº	5
Fecha	15/06/2016
Observaciones	
Diámetro recipiente (cm)	7,00
Altura recipiente (cm)	4,54
Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	174,82
Altura muestra (cm)	4,54
Volumen muestra (cm <sup>3</sup> )	174,82
Peso muestra seca (g)	280,00
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,60
Altura partículas (cm)	2,69
Índice poros	0,69
Tara (g)	21,36
T+S+A (g)	27,92
T+S (g)	26,75
Humedad (%)	21,71
Grado saturación (%)	85,47
Succión (kPa)	1,50

Tabla 10: Resultado succión  $S_r = 0,85$ .

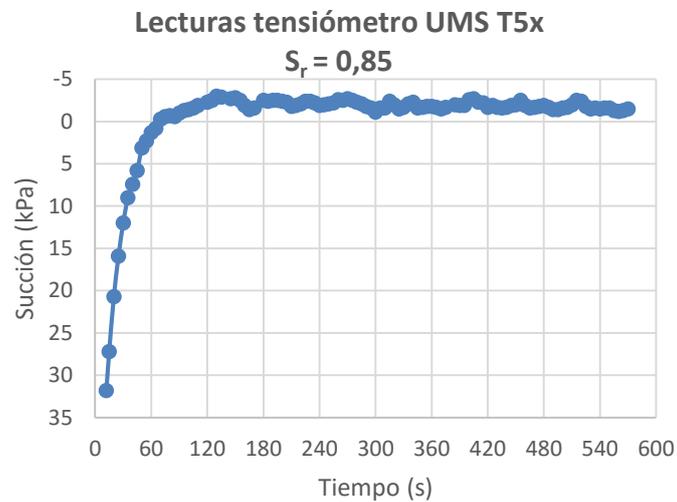


Figura 19: Lecturas tensiómetro muestra 5,  $S_r = 0,85$ .

<b>Muestra nº</b>	<b>6</b>
<b>Fecha</b>	16/06/2016
<b>Observaciones</b>	Recipiente nº2
<b>Diámetro recipiente (cm)</b>	7,00
<b>Altura recipiente (cm)</b>	4,54
<b>Volumen recipiente (cm<sup>3</sup>)</b>	174,82
<b>Altura muestra (cm)</b>	4,54
<b>Volumen muestra (cm<sup>3</sup>)</b>	174,82
<b>Peso muestra seca (g)</b>	280,00
<b><math>\gamma_d</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,60
<b>Altura partículas (cm)</b>	2,69
<b>Índice poros</b>	0,69
<b>Tara (g)</b>	63,33
<b>T+S+A (g)</b>	71,05
<b>T+S (g)</b>	69,76
<b>Humedad (%)</b>	20,06
<b>Grado saturación (%)</b>	78,99
<b>Succión (kPa)</b>	4,50

Tabla 11: Resultado succión  $S_r = 0,79$ .

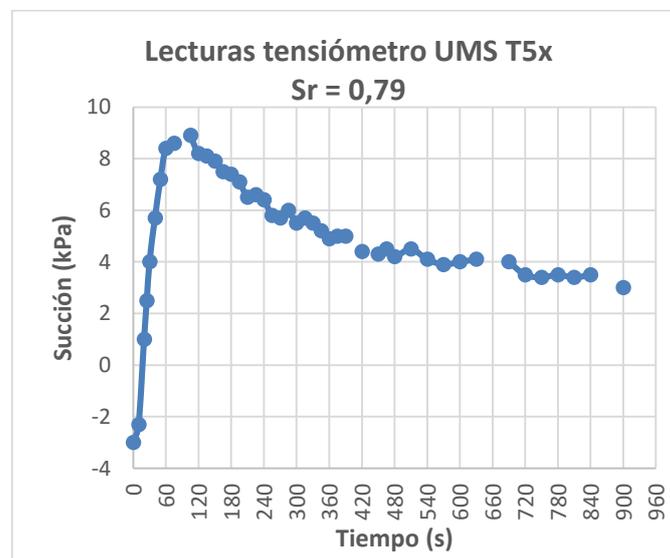


Figura 20: Lecturas tensiómetro muestra 6,  $S_r = 0,79$ .

En la Figura 21 se muestran las succiones medidas para cada una de las muestras, en función de su grado de saturación ( $S_r$ ).

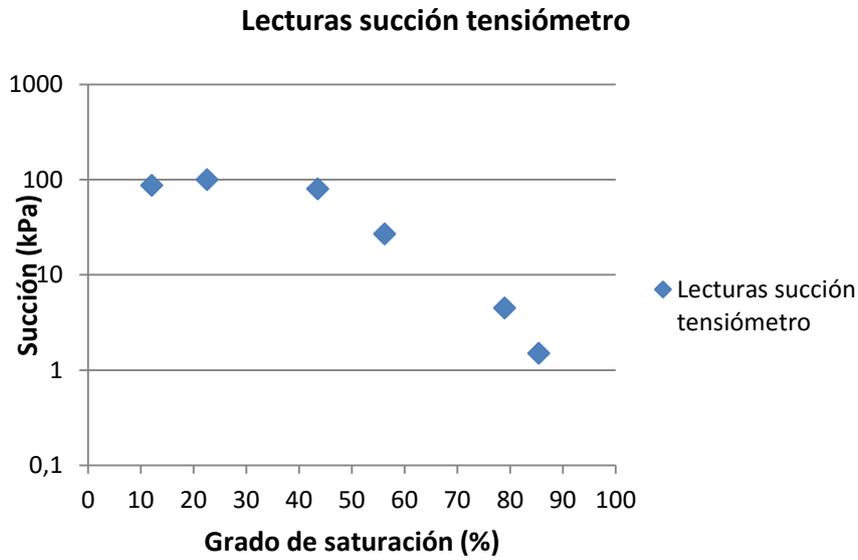


Figura 21: Lecturas succión en función del grado de saturación.

### 3.3.1.4 Análisis

Una vez medida la succión para distintos grados de saturación se procede a obtener la curva de retención. Para ello se utiliza la aproximación de *Van Genuchten (1980)*, detallada en la ecuación (4).

$$S_r \text{ (Van Genuchten)} = [\theta \cdot (S_{r1} - S_{r0}) + S_{r0}] \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{s}{P_0}\right)^n\right)^m}$$

Dónde:

$S_{r1}$ : Parámetro de Van Genuchten, grado saturación máximo

$S_{r0}$ : Parámetros de Van Genuchten, grado saturación mínimo

$\theta$ : Parámetro de Van Genuchten, grado saturación efectivo.

s : succión

n, m,  $P_0$  : Parámetros de Van Genuchten

La aproximación de *Van Genuchten* permite calcular el grado de saturación en función de la succión medida y de los parámetros de *Van Genuchten*.

En la Tabla 12 se detallan los grados de saturación correspondientes a cada succión medida, y el grado de saturación calculado mediante ésta aproximación. Los parámetros de Van Genuchten se han obtenido con ayuda de un *solver* en *Excel*, para ello se ha encontrado la mínima suma de las diferencias de cada lectura elevadas al cuadrado. En la Tabla 13 se muestran los parámetros de Van Genuchten usados para aproximar la curva de retención por mínimos cuadrados.

Muestra nº	Lecturas tensiómetro		Aproximación Van Genuchten	
	Grado de saturación (%)	Succión (kPa)	Sr Van Genuchten en función lecturas tensiómetro	dif <sup>2</sup>
1	56,22	27,0	57,55	1,76
2	12,09	87,0	26,19	198,69
3	22,60	100,0	22,39	0,05
4	43,55	80,0	28,54	225,12
5	85,47	1,5	84,18	1,66
6	78,99	4,5	80,27	1,64
			<b>suma dif<sup>2</sup></b>	<b>428,91</b>

Tabla 12: Lecturas tensiómetro en función grado de saturación y grado de saturación calculado según aproximación Van Genuchten (1980).

Parámetros Van Genuchten				
sr0	sr1	p0	n	m
0,00	0,86	456,87	0,97	6,58

Tabla 13: Parámetros de Van Genuchten obtenidos por mínimos cuadrados.

En la Figura 22 se muestra la curva de retención obtenida. Se observa como el agua es liberada de los poros a succiones no muy elevadas, entre 1 y 100 kPa, donde las succiones decrecen gradualmente. Se puede relacionar con el tamaño de los poros, cuanto más grandes son éstos más rápido es liberada el agua, correspondiéndose con el comportamiento típico de un suelo limoso con arena.

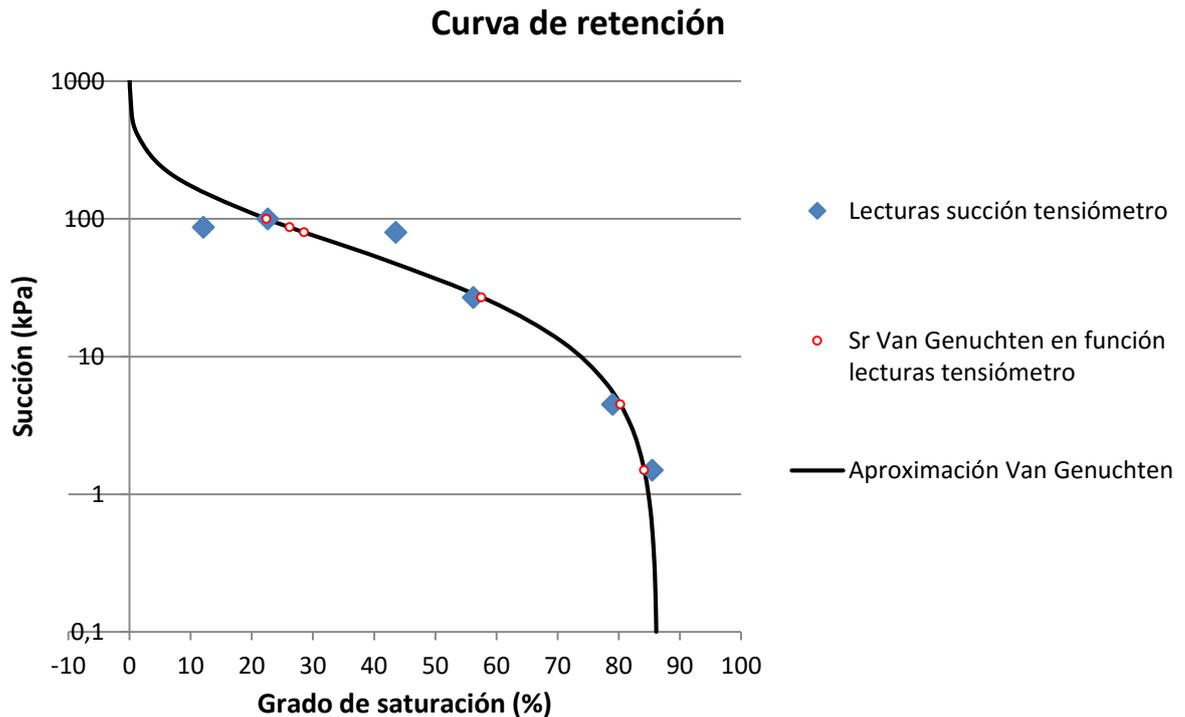


Figura 22: Curva de retención aproximada.

En la Figura 22 observamos como la aproximación de Van Genuchten no es muy precisa en las primeras 3 lecturas, con grados de saturación bajos. Sin embargo, para grados de saturación más elevados la aproximación es buena. Suponiendo un contenido de humedad mayor del 10% y densidades secas próximas a 1,6 g/cm<sup>3</sup> (índice de poros 0,68) se estima que el grado de saturación del futuro terraplén experimental será mayor al 35%, es por ello que la curva de retención obtenida será de utilidad para obtener la succión para los grados de saturación previstos. En la Tabla \_\_ se muestra el grado de saturación previsto para distintas humedades y

$S_r$ f( $\omega$ , $\rho_s$ , e)			
$\omega$ (%)	e	$\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	Sr (%)
1	0,68	2,7	4,0
3	0,68	2,7	11,9
5	0,68	2,7	19,9
10	0,68	2,7	39,7
15	0,68	2,7	59,6
20	0,68	2,7	79,4
25,19	0,68	2,7	100,0

Tabla 14: Grado de saturación en función de la humedad, la densidad de las partículas y el índice de poros correspondiente a una densidad seca de 1,6 Mg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.2 Permeabilidad (K)

## 3.4 Resistencia al corte directo: Ensayo corte directo CD

Se ha realizado una serie de ensayos de corte directo consolidados y drenados (CD) para estimar la resistencia del terreno a esfuerzo cortante y poder analizar la estabilidad de los futuros terraplenes a construir. La resistencia a esfuerzo cortante se entiende como la resistencia máxima que soporta una masa de suelo antes de fallar y deslizar sobre un plano definido dentro de él y siendo uno de los aspectos más importantes en cualquier estudio geotécnico.

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb (1) establece que la resistencia a rotura en un plano de falla es la suma de la resistencia debida a la cohesión y la resistencia debida a la fricción interna de las partículas:

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan\phi' \quad (1)$$

Dónde:

$\tau_f$ : Tensión de corte de rotura

$c'$ : cohesión efectiva

$\sigma'$ : Tensión normal efectiva

$\phi'$ : Ángulo rozamiento interno de las partículas

El objetivo de los ensayos de corte realizados es estimar los parámetros resistentes a esfuerzo cortante, como la cohesión y el ángulo de rozamiento crítico, así como el ángulo de fricción residual o a volumen constante.

La obtención de estos parámetros nos permite estimar el ángulo necesario de los taludes del terraplén a construir, dado que se pretende que los taludes acaben rompiendo con el paso del tiempo, una vez hecha la construcción y colocada toda la instrumentación.

### 3.4.1 Equipo y método de ensayo

El espesor a instrumentar, y dónde se requieren que se produzcan las roturas, es pequeño, entre 1-1,5 metros, y en consecuencia las tensiones a las que se verá solicitado el talud en ese espesor serán pequeñas también.

Con el fin de poder ensayar el suelo a tensiones tan bajas, se ha modificado ligeramente el pistón superior a la muestra, permitiendo aplicar la carga directamente encima de la muestra. En la Figura 23 y 24 se muestra un esquema del equipo de corte directo y de la disposición del sistema de carga modificado respectivamente.

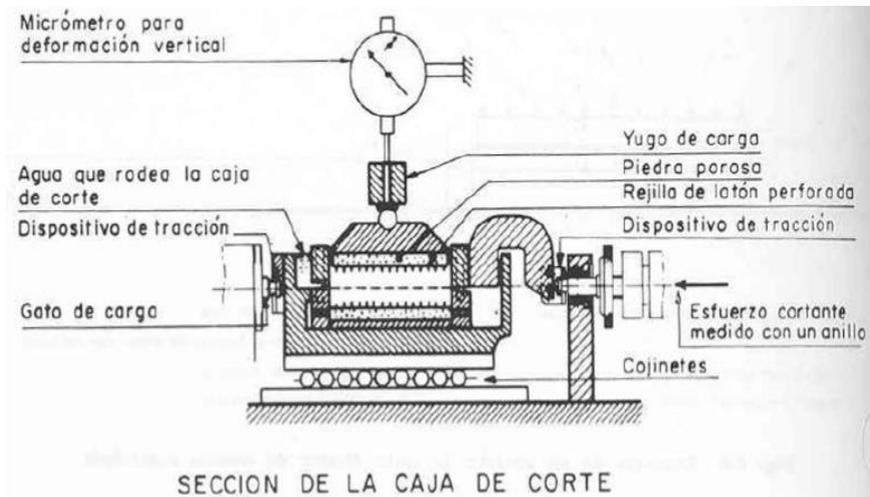


Figura 23: Equipo de corte directo. Apuntes "Ensayos de resistencia en suelos" de la asignatura de Mecánica de suelos del Máster en Ingeniería del Terreno.



Figura 24 Detalle pistón modificado para la colocación pequeñas cargas.

Con éste equipo se ha ensayado el suelo limoso procedente del *Parc de Recerca de la UPC Agròpolis*, situado en Viladecans, en la provincia de Barcelona. Para ello se introduce la muestra de suelo en una caja rígida de acero dividida en dos mitades (ver Figura 23), a la que se aplica una carga vertical a través de un pistón rígido modificado para permitir cargar directamente sobre la muestra a tensiones reducidas (Figura 24).

Se ha decidido que la densidad seca del espesor a instrumentar en el talud de campo, y dónde se requiere que se produzcan las roturas, será de en torno a los  $1.6 \text{ g/cm}^3$ . Es por

este motivo que la densidad seca inicial de las muestras ensayados con el aparato de corte directo serán lo más próximas posibles a este valor.

La densidad seca inicial de cada una de las muestras ensayadas se ha obtenido con la ayuda de la prensa que se muestra en la Figura 25.



*Figura 25: Prensa para obtener la densidad seca inicial requerida.*

Se han realizado dos tipos de ensayos de corte directo:

- En condiciones no saturadas, con la humedad natural de las muestras obtenidas en el campo.
- En condiciones saturadas, obteniendo asimismo un rango de magnitud para la permeabilidad gracias al edómetro del propio equipo.

Una vez densificada la muestra dentro de la caja rígida se ha introducido en la banqueta del aparato de corte directo, saturándola durante 24 horas en caso de realizar el ensayo de corte en condiciones saturadas. Antes de inducir la rotura de la muestra dentro de la caja rígida, se ha procedido a consolidar la muestra con la carga correspondiente a cada ensayo. El tiempo de consolidación de cada muestra ha variado entre los 20-60 minutos para las muestras con humedad natural, y las 24 horas para las muestras completamente saturadas.

Después de consolidar la muestra se ha procedido a realizar el ensayo de corte, deslizando una porción de la muestra respecto a otra a lo largo de un plano de falla determinado por la unión de las dos mitades de la caja rígida, induciendo tensiones tangenciales o de corte. Para ello, se aplica un esfuerzo vertical normal al plano de movimiento (la misma carga que la aplicada durante la consolidación), y soltando los marcos que contienen la muestra y desplazando el marco inferior respecto al superior a una velocidad constante, se mide la fuerza horizontal necesaria para impedir el

movimiento de la mitad superior y el desplazamiento vertical de la muestra. Dividiendo la fuerza horizontal aplicada por la sección de la muestra se obtiene la tensión tangencial actuante. Se considera que esta sección no cambia y es igual al área de la sección horizontal de la muestra. Mediante un micrómetro se mide el desplazamiento vertical de la muestra, obteniendo el cambio de volumen de la muestra.

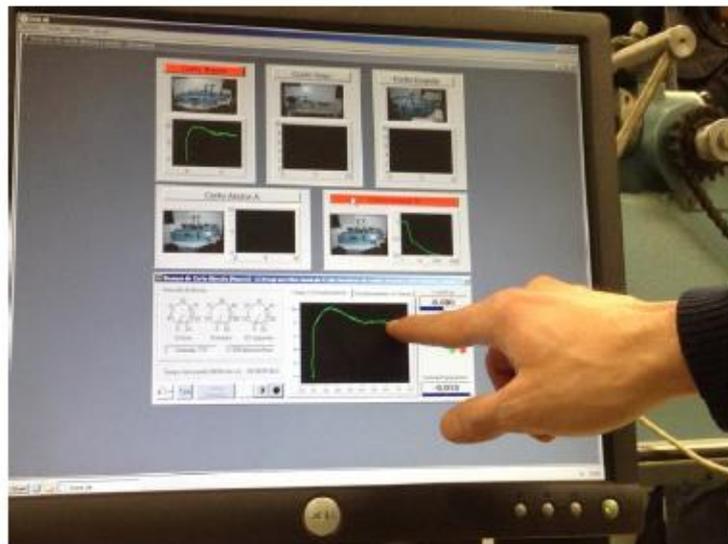
La relación entre la carga sobre la muestra y la tensión vertical aplicada es la siguiente: por cada kp sobre la muestra obtenemos 3.48 kPa.

La metodología seguida para la realización del ensayo de corte directo queda resumida en los siguientes puntos:

- Preparación del equipo:
  - Limpiar y engrasar las paredes del anillo y las superficies de corte.
  - Anotar las dimensiones y pesos de los componentes de la célula.
  - Ajustar posiciones de los tornillos y comprobar el mecanismo.
  
- Preparación de la muestra:
  - Limo: remoldeado, con una densidad inicial próxima a 1.6 g/cm<sup>3</sup> obtenida mediante una prensa.
  
- Velocidad de desplazamiento:
  - Muestra humedad natural, Ensayo drenado en limos: 1.2 mm/min
  - Muestra saturada, Ensayo drenado en limos: 0.008 mm/min
  
- Procedimiento de ensayo:
  - Ensayo con humedad natural, no saturado:
    - Medir la célula de corte dónde se coloca la muestra de suelo.
    - Colocar la placa ranurada y una piedra porosa en la parte inferior de la célula de corte.
    - Pesar la muestra a ensayar, colocarla dentro de la célula de carga y mediante la prensa densificarla hasta un valor próximo a 1.6 g/cm<sup>3</sup>.

- Medir la altura de la muestra dentro de la célula de corte determinar su densidad inicial.
- Colocar una piedra porosa encima de la muestra + pistón modificado + carga vertical correspondiente.
- Ajustar el comparador: desplazamiento vertical
- Consolidación de la probeta (tornillos de fijación): entre 20 y 60 minutos.
- Desplazamiento a velocidad de 1.2mm/min controlada por motor hasta rotura (7-8 mm), aproximadamente 7 minutos. Medición de la trayectoria de avance.
- Retirar la carga vertical.
- Desmontar la célula y recuperar toda la probeta: humedad y densidad
- Repetir el ensayo a diferente tensión vertical
- Análisis de los resultados obtenidos mediante el programa informático de la UPC GeoLAB: valores de carga tangencial, desplazamiento horizontal y desplazamiento vertical.

En la Figura 26 se observa la obtención de datos de manera automatizada mediante un ordenador y el software de la *UPC GeoLAB*.



*Figura 26: Obtención de datos de manera automatizada mediante el uso de UPC-GeoLAB.*

- Ensayo saturado:
  - Medir la célula de corte dónde se coloca la muestra de suelo.
  - Colocar la placa ranurada y una piedra porosa en la parte inferior de la célula de corte.
  - Pesar la muestra a ensayar, colocarla dentro de la célula de carga y mediante la prensa densificarla hasta un valor próximo a  $1.6 \text{ g/cm}^3$ .
  - Medir la altura de la muestra dentro de la célula de corte determinar su densidad inicial.
  - Colocar una piedra porosa encima de la muestra + pistón modificado
  - Ajustar el comparador: desplazamiento vertical
  - Precargar la muestra con una carga pequeña, de 1 kp, de manera que consolide durante 20 minutos.
  - Llenar la banqueta de agua, donde se coloca la célula de corte, y dejarlo saturar entre 12 y 24h. Medir el desplazamiento vertical al precargar y saturar la muestra.
  - Cargar la muestra hasta alcanzar la carga deseada para el ensayo de corte.
  - Consolidación de la probeta (tornillos de fijación): 24 horas.
  - Desplazamiento a velocidad de  $0.008 \text{ mm/min}$  controlada por motor hasta rotura (7-8 mm), aproximadamente durante 24 horas. Medición de la trayectoria de avance.
  - Retirar la carga vertical.
  - Desmontar la célula y recuperar toda la probeta: humedad y densidad
  - Repetir el ensayo a diferente tensión vertical
  - Análisis de los resultados obtenidos mediante el programa informático de la *UPC GeoLAB*: valores de carga tangencial, desplazamiento horizontal y desplazamiento vertical.

El ensayo se repite con diferentes tensiones verticales, obteniendo la resistencia máxima al corte, o cortante de falla ( $\tau_f$ ), para cada escalón de carga, y graficando los resultados en función del esfuerzo normal aplicado. Sobre los diversos puntos de rotura se ajusta una recta, o envolvente de rotura, cuya pendiente representa el ángulo de rozamiento, correspondiente al ángulo de rozamiento de pico para las tensiones de corte de pico, y al ángulo de rozamiento a volumen constante para las tensiones de corte últimas.

En la Figura 27 se representan los comportamientos resistentes, y de deformación volumétrica típicos, que puede tener una muestra limosa o arcillosa en función de si está normalmente consolidada (NC) o sobreconsolidada (SC). En general se observa un comportamiento dilatante en las muestras sobreconsolidadas, y contractante en las muestras normalmente consolidadas.

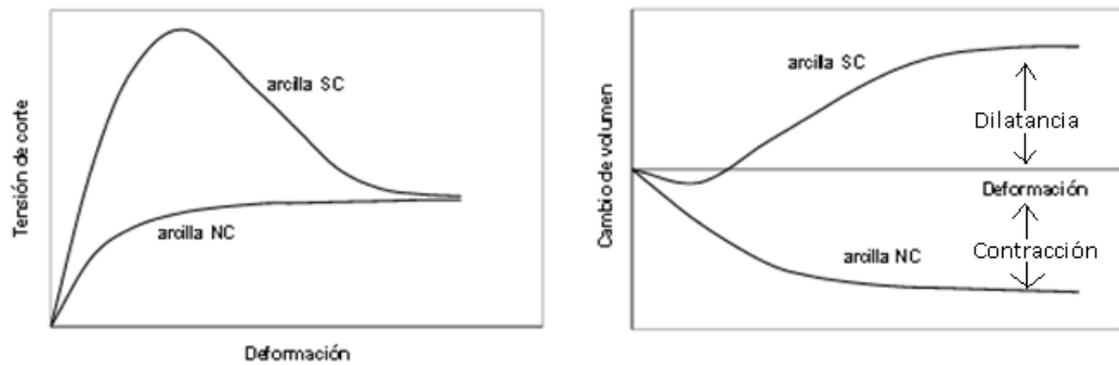


Figura 27: Tensión de corte y cambio de volumen versus deformación de corte.

### 3.4.2 Cálculo y análisis de resultados muestra humedad natural

Se han realizado un total de 15 ensayos de corte consolidados drenados (CD) con humedad natural. En la Tabla 15 y 16 se resumen los parámetros y resultados, anteriores y posteriores, para cada uno de los ensayos de corte realizados.

Fecha (año 2016)	Carga (kp)	Relación tensión vertical /carga (kPa/kp):	EQUIPO (CAJA DE CORTE)				MUESTRA ANTES CORTE									
			$\sigma_n$ Tensión vertical (kPa)	Calibración rigidez anillo (mm/kp)	Diámetro caja de corte (mm)	Altura caja corte (mm)	$\gamma_s$ Densidad partículas (Mg/m <sup>3</sup> )	$\omega_{nat}$ Humedad natural (%)	Peso muestra húmeda (g)	Peso muestra seca (g)	Hueco superior caja corte (mm)	Altura muestra (mm)	Altura partículas (mm)	$\gamma_{di}$ Densidad seca inicial (Mg/m <sup>3</sup> )	$e_i$ Índice poros inicial	$S_{ri}$ Grado saturación inicial
07-abr	2,0	3,48	7,0	0,0207	59,9	41,08	2,7	20	136,58	113,81	8,75	29,33	14,96	1,379	0,96	0,56
13-abr	2,0		7,0					20	160,92	134,10	8,35	29,73	17,62	1,6	0,69	0,79
13-abr	4,0		14,1					20	160,92	134,10	7,78	30,30	17,62	1,59	0,70	0,78
21-abr	2,0		7,0					20	160,92	134,10	8,13	29,95	17,62	1,59	0,69	0,78
22-abr	2,0		7,0					20	160,92	134,10	6,70	31,38	17,62	1,52	0,77	0,70
22-abr	4,0		14,1					20	160,92	134,10	7,04	31,04	17,62	1,54	0,75	0,72
22-abr	6,0		20,9					20	160,92	134,10	7,01	31,06	17,62	1,54	0,75	0,72
29-abr	8,4		29,4					17,4	160,98	137,11	7,55	30,53	18,02	1,6	0,68	0,69
29-abr	1,0		3,5					16,3	159,92	137,55	8,15	29,93	18,08	1,63	0,65	0,67
05-may	8,1		28,1					16,1	160,91	138,60	7,75	30,33	18,22	1,64	0,64	0,67
09-may	4,0		14,1					15,4	160,90	139,42	8,03	30,05	18,32	1,65	0,63	0,66
09-may	6,3		22,0					15,4	160,90	139,40	7,95	30,13	18,32	1,66	0,63	0,67
26-may	0,5		1,8					14,8	160,92	140,13	8,24	29,84	18,42	1,67	0,62	0,65
26-may	1,0		3,5					15,3	160,90	139,58	8,44	29,64	18,35	1,67	0,61	0,67
26-may	1,5		5,3					15,6	160,92	139,20	8,63	29,45	18,3	1,68	0,60	0,70

Tabla 15: Resumen parámetros al inicio del ensayo de corte CD con humedad natural.

**MUESTRA DESPUÉS CORTE**

Fecha (año 2016)	$\sigma_n$ Tensión vertical (kPa)	Cambio altura (mm)	$\gamma_{df}$ Densidad seca final (Mg/m <sup>3</sup> )	$e_f$ Índice poros final	$S_{rf}$ Grado saturación final	$\tau_{pico}$ Tensión tangencial pico (kPa)	$\tau_{cv}$ Tensión tangencial volumen constante (kPa)	$\phi'_{pico}$ Ángulo rozamiento pico (°)	$\phi'_{cv}$ Ángulo rozamiento vol. cte (°)	$\psi$ Dilatancia (°)	$\chi_{pico}$ Desplazamiento horizontal pico (mm)
07-abr	7,0	0,003	1,38	0,96	0,56	34,7	30,2	78,5	76,9	0,0	3,3
13-abr	7,0	0,911	1,55	0,74	0,73	55,6	25,1	82,8	88,4	29,0	2,9
13-abr	14,1	0,437	1,55	0,74	0,73	59,5	48,8	76,7	89,2	12,4	3,8
21-abr	7,0	1,769	1,50	0,80	0,68	68,9	33,5	84,2	78,1	16,5	3,5
22-abr	7,0	1,007	1,47	0,84	0,65	66,5	38,6	84,0	79,7	21,4	2,6
22-abr	14,1	0,69	1,50	0,80	0,68	58,0	35,4	76,4	68,3	13,0	3,1
22-abr	20,9	0,125	1,53	0,77	0,70	58,3	36,9	70,3	60,5	11,3	1,7
29-abr	29,4	0,573	1,57	0,73	0,65	99,4	81,9	73,5	89,5	17,4	4,4
29-abr	3,5	0,638	1,60	0,69	0,64	8,9	5,9	68,6	83,7	5,5	3,2
05-may	28,1	0,354	1,60	0,68	0,64	103,1	65,3	74,8	89,4	25,0	3,5
09-may	14,1	0,666	1,61	0,68	0,62	72,8	45,0	79,1	89,2	22,8	2,2
09-may	22,0	0,44	1,62	0,67	0,62	102,8	59,2	77,9	89,4	23,1	2,8
26-may	1,8	0,961	1,62	0,67	0,60	52,7	50,0	88,0	89,3	32,6	1,1
26-may	3,5	1,849	1,57	0,72	0,58	87,5	25,4	87,7	88,6	39,0	2,6
26-may	5,3	1,403	1,60	0,69	0,61	109,5	30,0	87,2	88,8	51,0	3,2

*Tabla 16: Resumen parámetros al final del ensayo de corte CD con humedad natural.*

En la Tabla 16 se observa como las muestras tienden a presentar un pico en la tensión de rotura y un comportamiento dilatante, propio de las muestras sobreconsolidadas. Una vez alcanzado el valor de pico, o la tensión tangencial máxima, su resistencia desciende hasta alcanzar la correspondiente a volumen constante.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos, ordenados según la fecha de ensayo.

### Ensayo de corte CD nº 1:

Fecha: 07/04/2016

Tensión normal aplicada: 7 kPa.

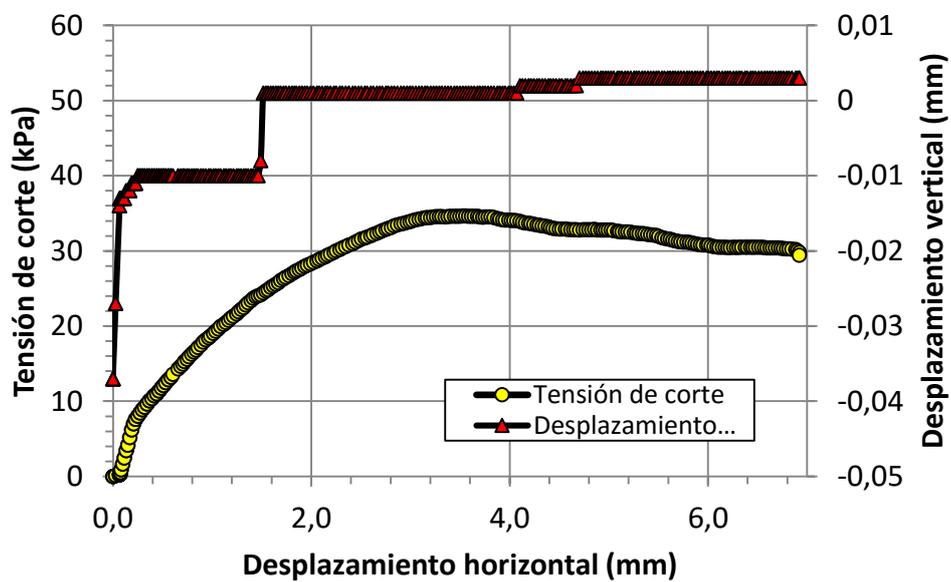


Figura 28: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº1 con tensión normal de 7 kPa.

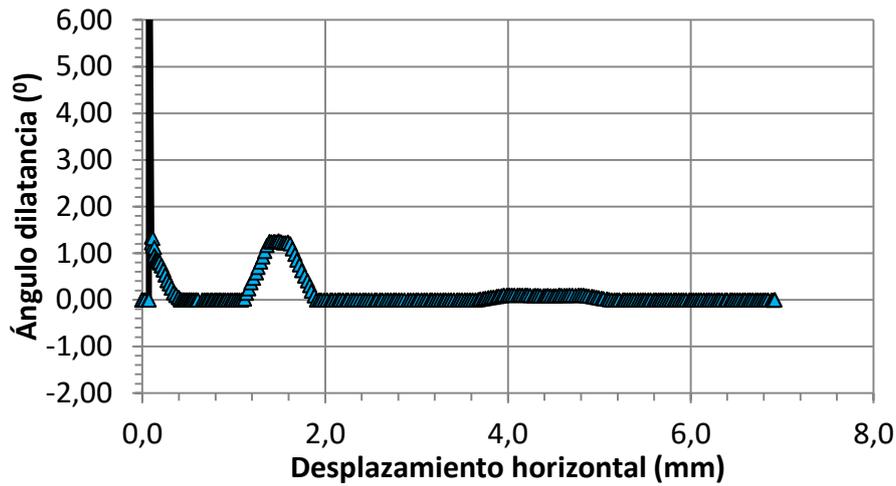


Figura 29: Ángulo de dilatación ( $\Psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº1 con tensión normal de 7 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
7,03	34,67	30,2	3,3	0

Tabla 17: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 2:**

Fecha: 13/04/2016

Tensión normal aplicada: 7 kPa.

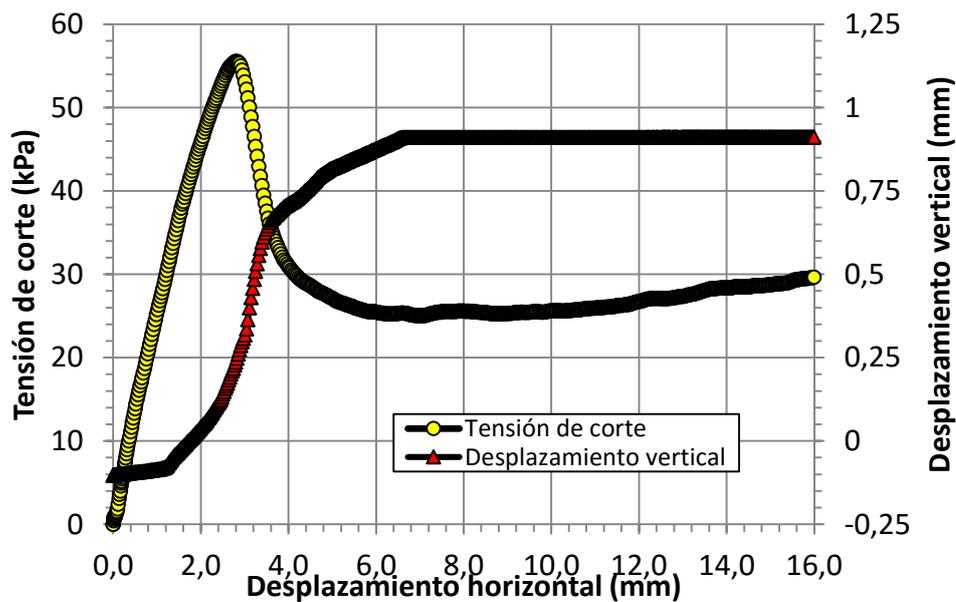


Figura 30: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº2 con tensión normal de 7 kPa.

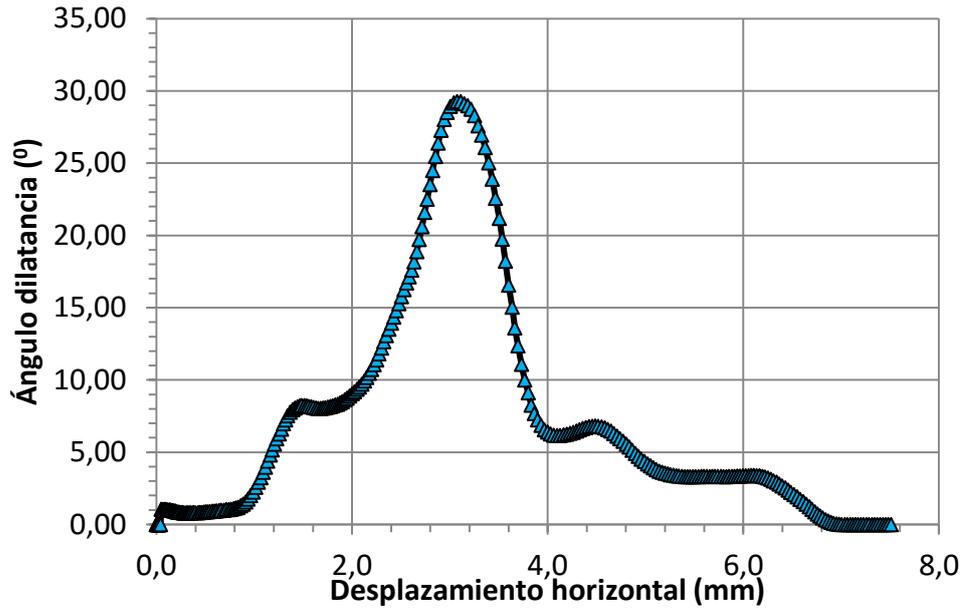


Figura 31: Ángulo de dilatación ( $\Psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº2 con tensión normal de 7 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
7,03	55,56	25,13	2,9	29

Tabla 18: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 3:**

Fecha: 13/04/2016

Tensión normal aplicada: 14 kPa.

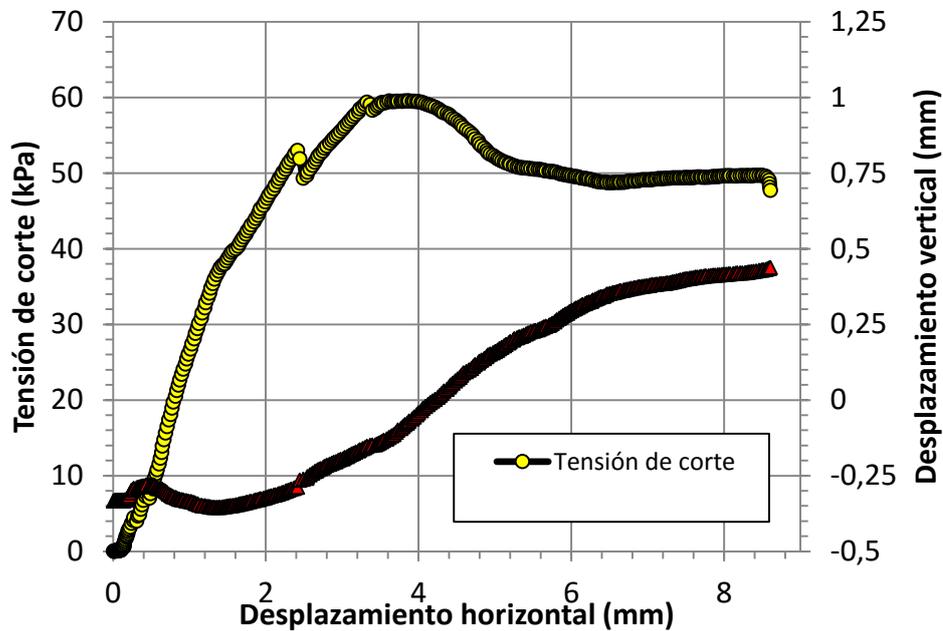


Figura 32: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº3 con tensión normal de 14 kPa.

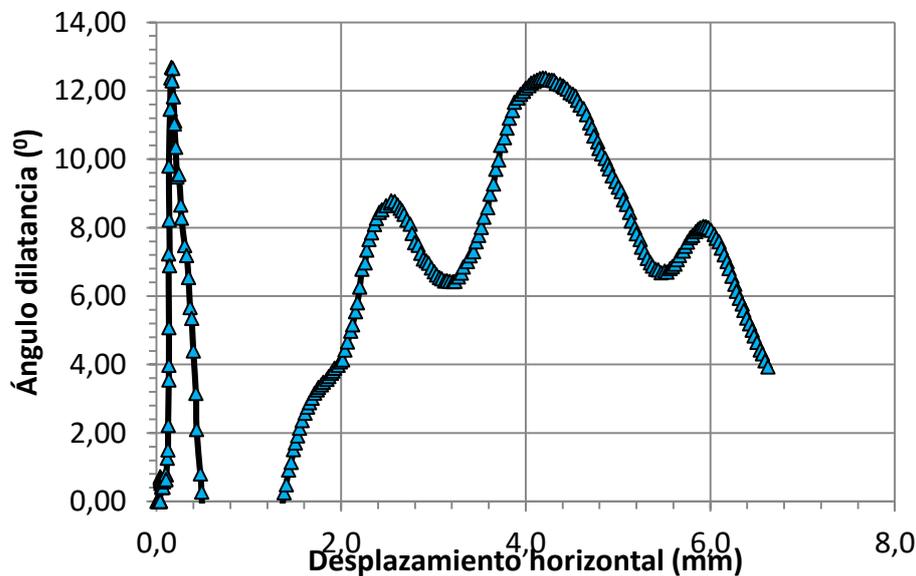


Figura 33: Ángulo de dilatación ( $\psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº3 con tensión normal de 14 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
14,06	59,53	48,8	3,8	12,4

Tabla 19: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 4:**

Fecha: 21/04/2016

Tensión normal aplicada: 7 kPa.

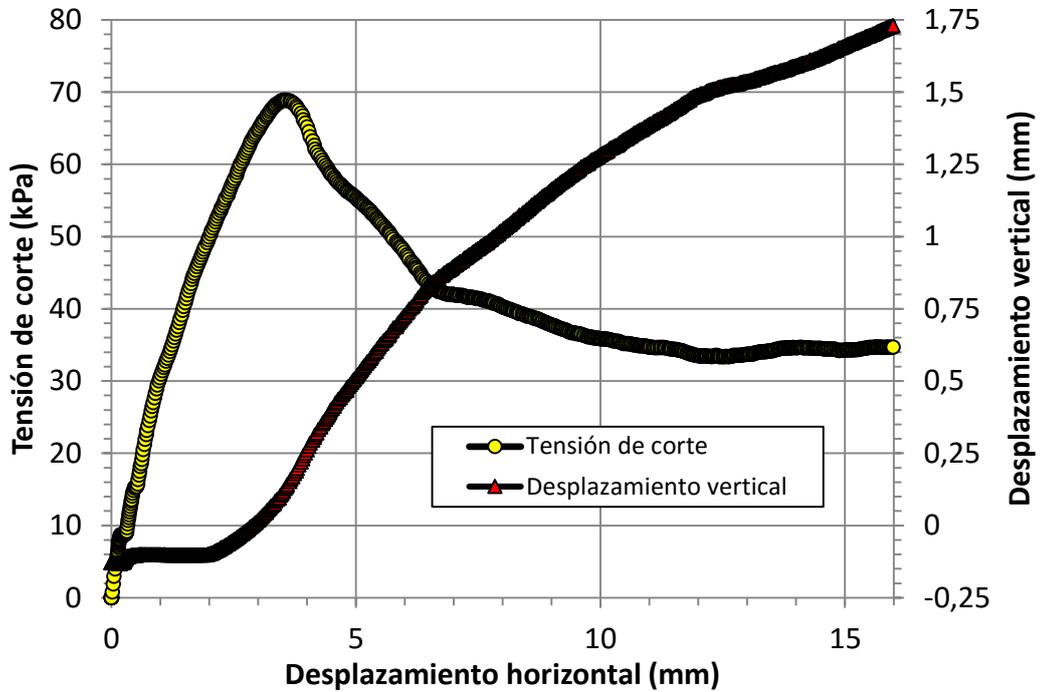


Figura 34: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº4 con tensión normal de 7 kPa.

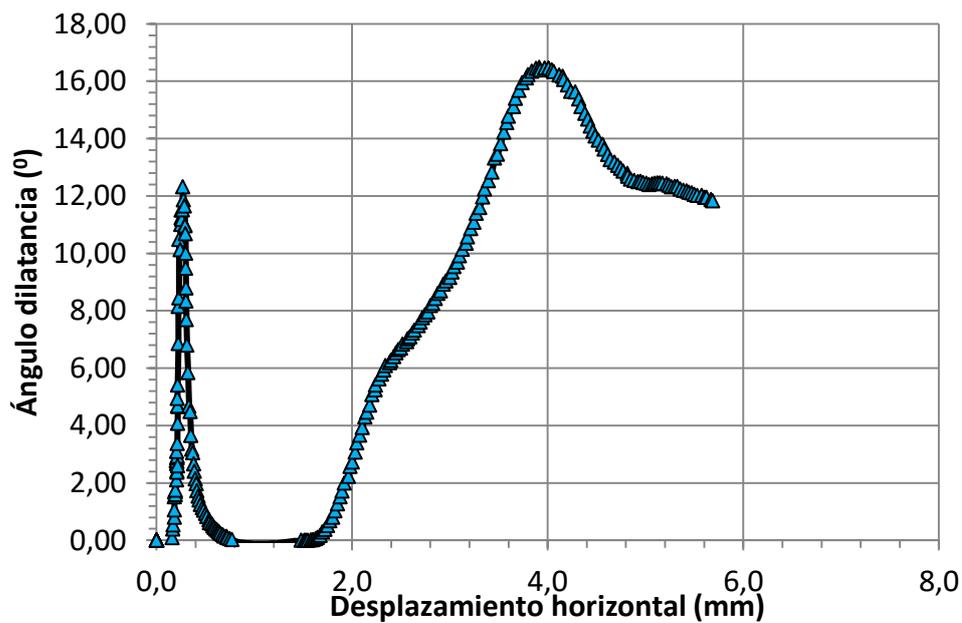


Figura 35: Ángulo de dilatación ( $\Psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº4 con tensión normal de 7 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$\chi_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
7,03	68,89	33,5	3,5	16,50

Tabla 20: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 5:**

Fecha: 22/04/2016

Tensión normal aplicada: 7 kPa.

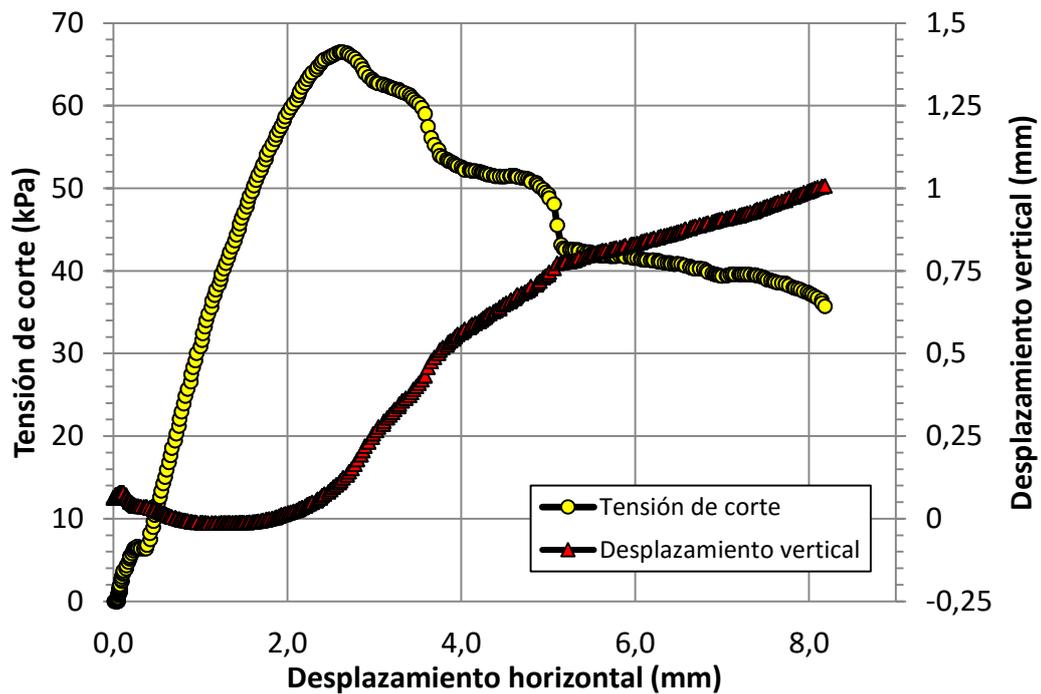


Figura 36: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº5 con tensión normal de 7 kPa.

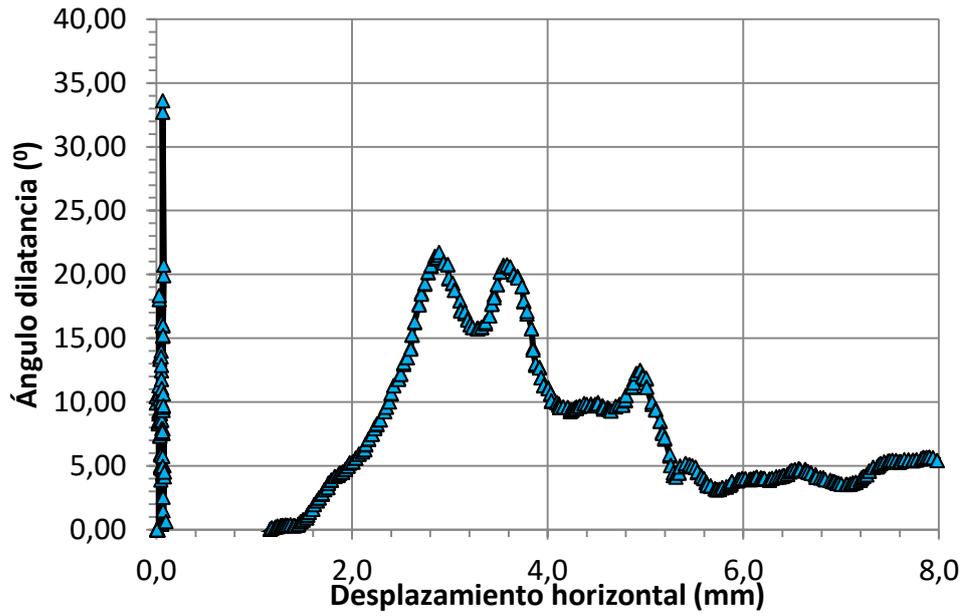


Figura 37: Ángulo de dilatación ( $\psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº5 con tensión normal de 7 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
7,03	66,46	38,6	2,6	21,4

Tabla 21: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 6:**

Fecha: 22/04/2016

Tensión normal aplicada: 14 kPa.

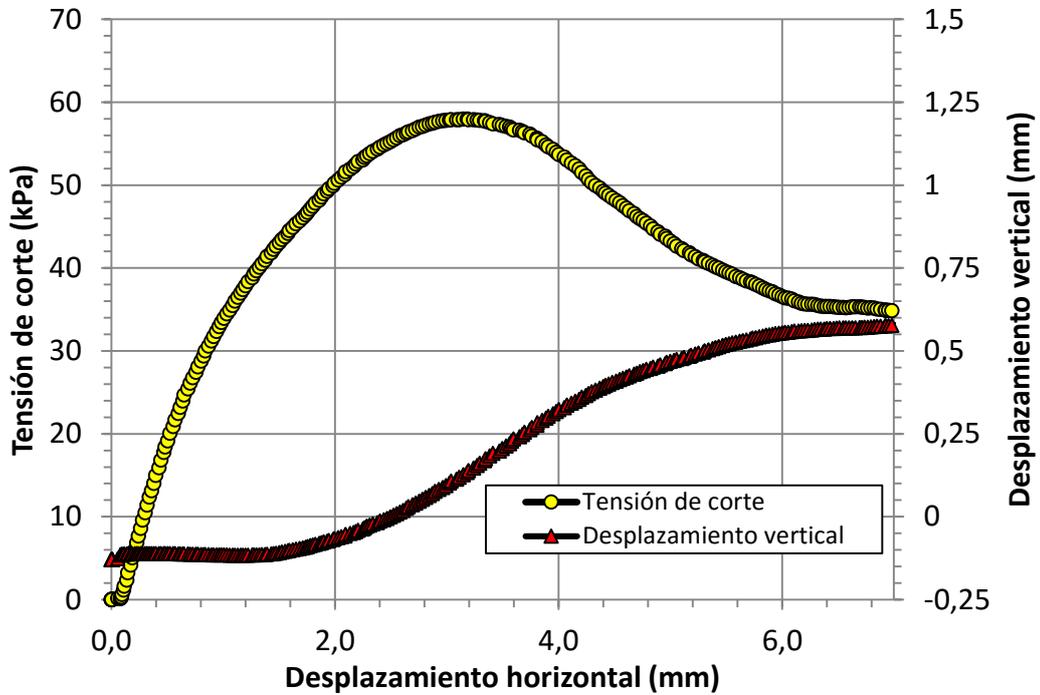


Figura 38: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº6 con tensión normal de 14 kPa.

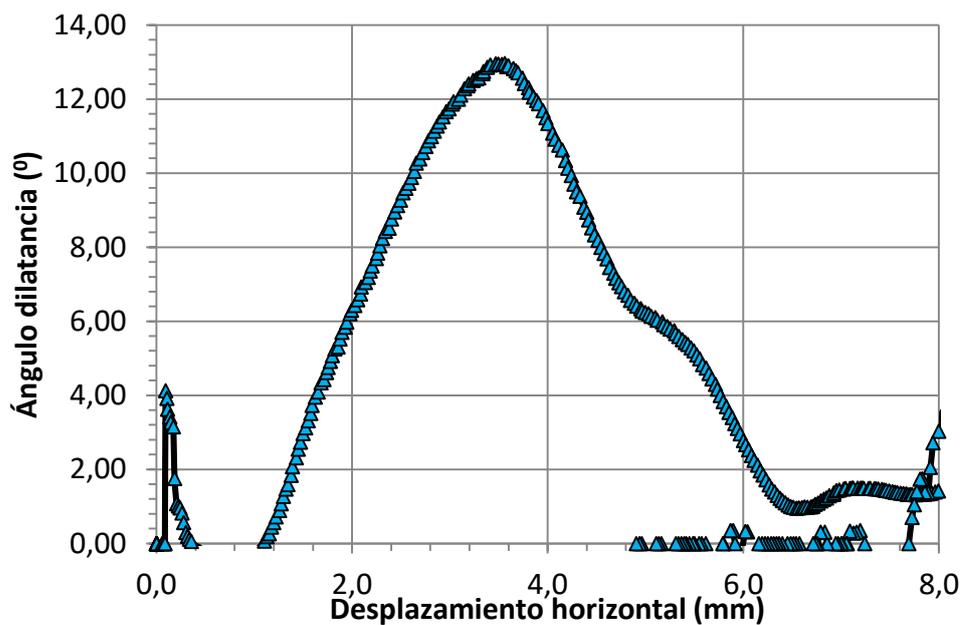


Figura 39: Ángulo de dilatación ( $\Psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº6 con tensión normal de 14 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
14,06	57,96	35,4	3,1	13

Tabla 22: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 7:**

Fecha: 22/04/2016

Tensión normal aplicada: 20,88 kPa.

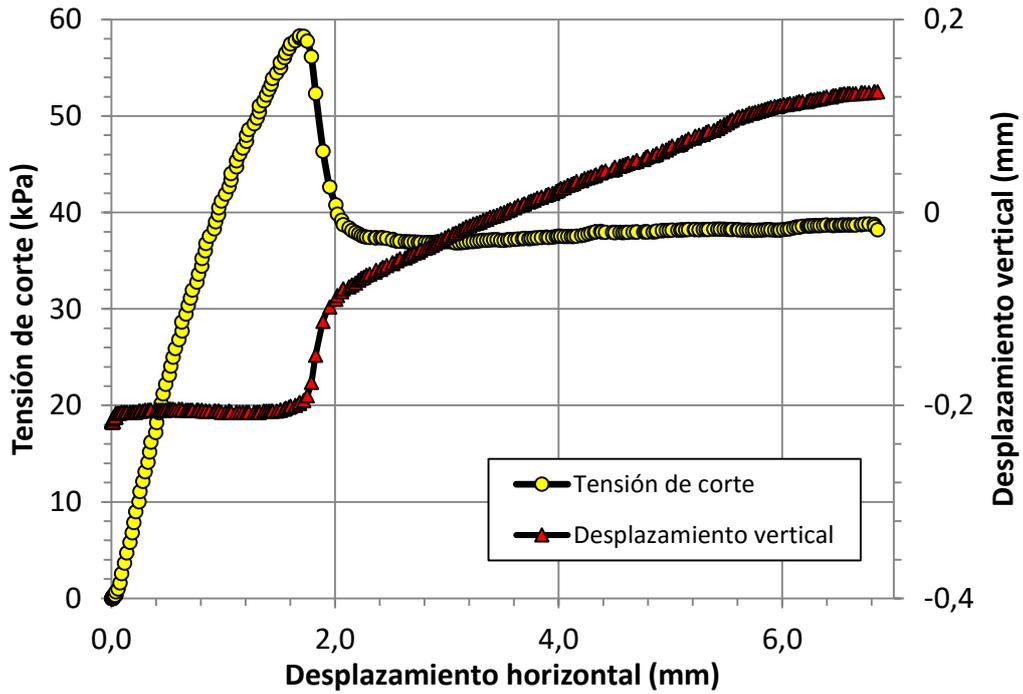


Figura 40: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº7 con tensión normal de 20,88 kPa.

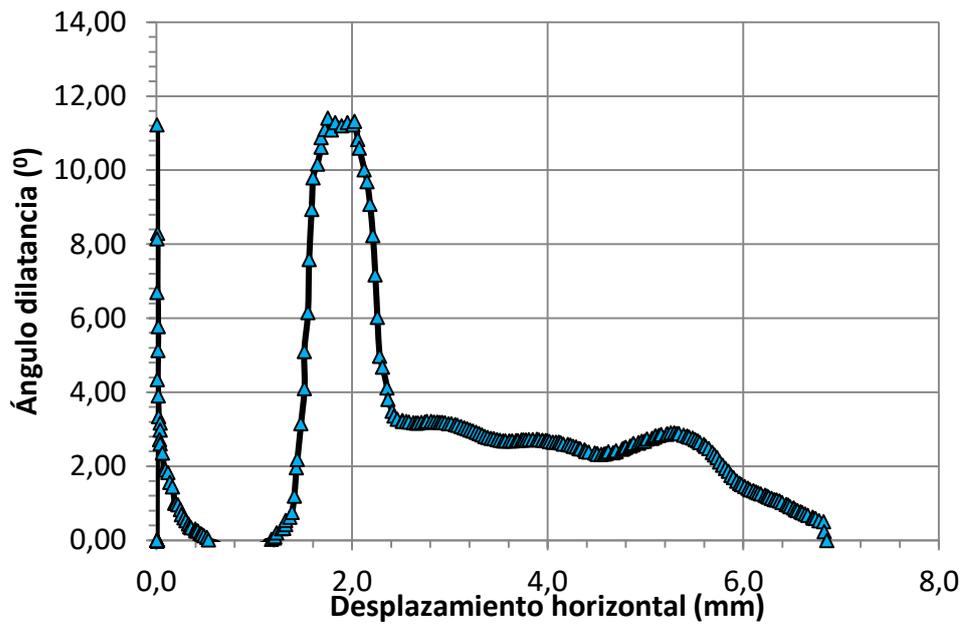


Figura 41: Ángulo de dilatación ( $\psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº7 con tensión normal de 20,88 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
20,88	58,31	36,9	1,7	11,3

Tabla 23: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 8:**

Fecha: 29/04/2016

Tensión normal aplicada: 29,4 kPa.

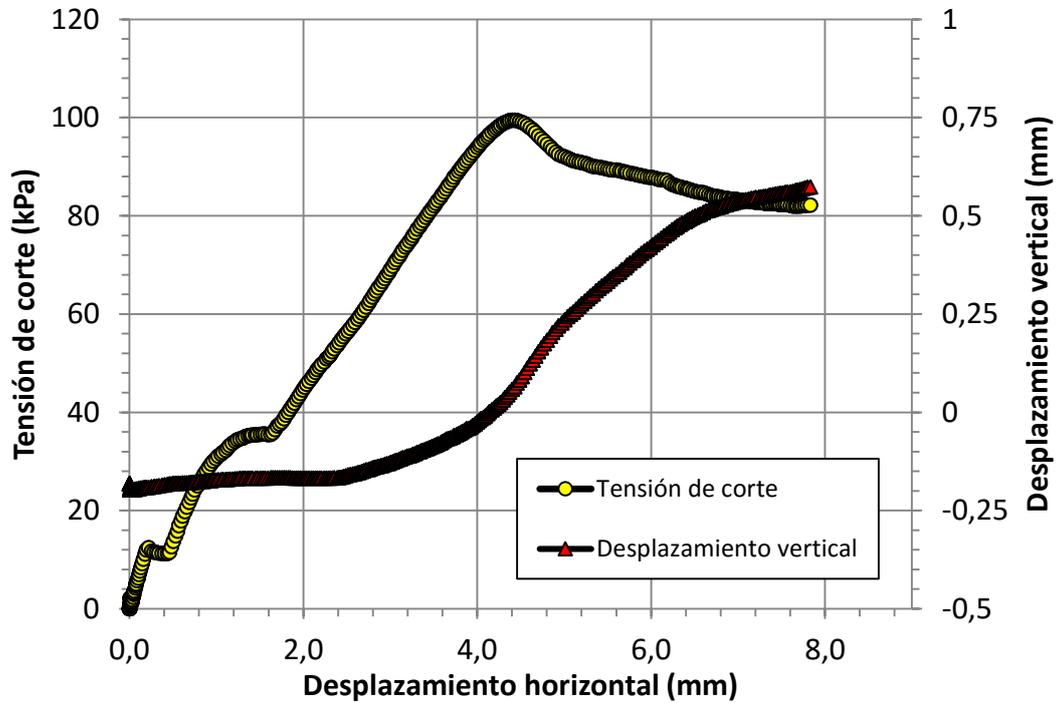


Figura 42: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº8 con tensión normal de 29,4 kPa.

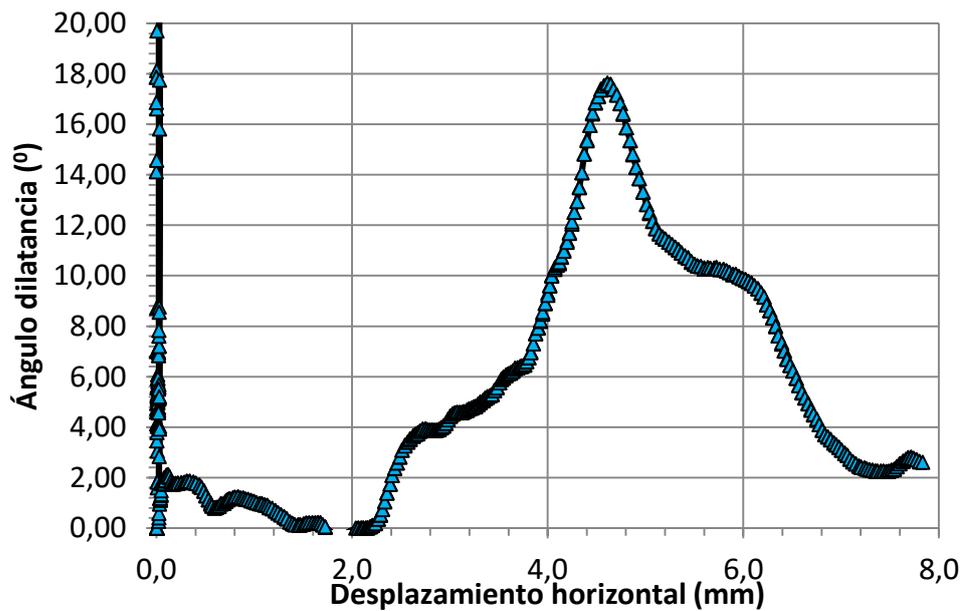


Figura 43: Ángulo de dilatación ( $\Psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº8 con tensión normal de 29,4 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
29,39	99,42	81,9	4,4	17,4

Tabla 24: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 9:**

Fecha: 29/04/2016

Tensión normal aplicada: 3,5 kPa.

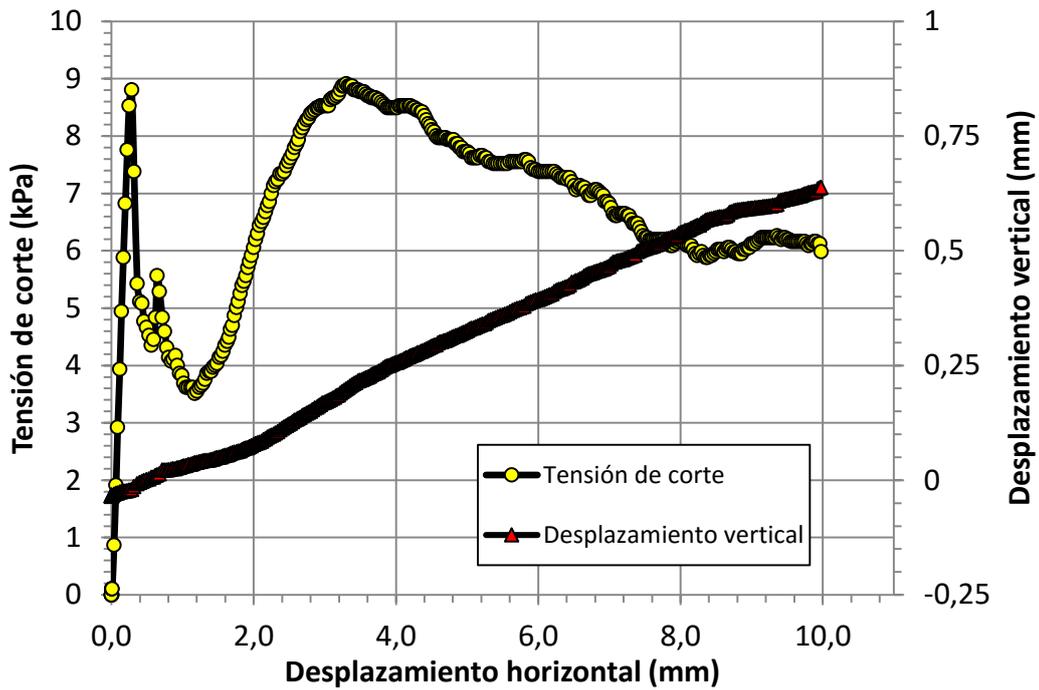


Figura 44: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº9 con tensión normal de 3,5 kPa.

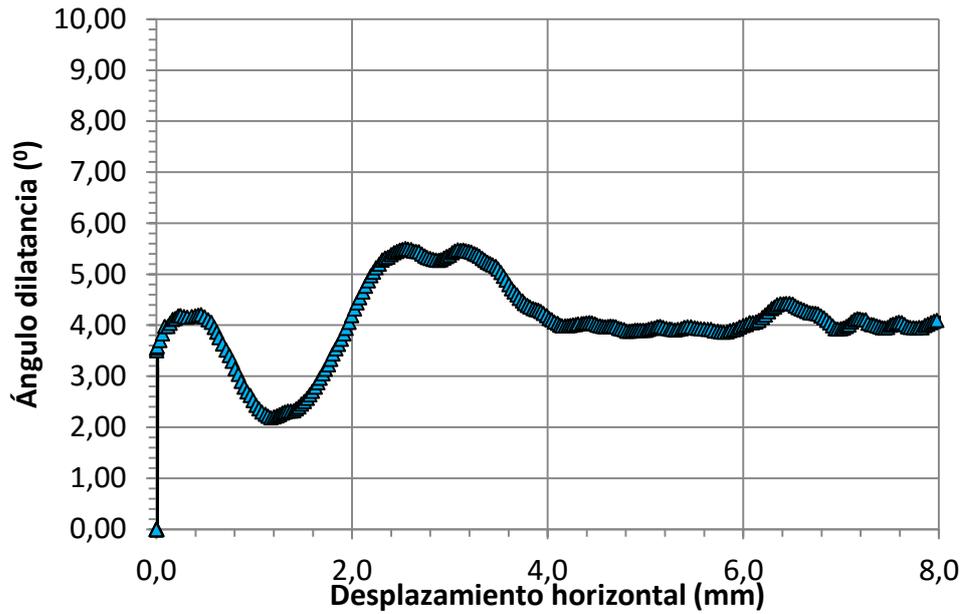


Figura 45: Ángulo de dilatación ( $\psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº9 con tensión normal de 3,5 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
3,49	8,91	5,9	3,2	5,5

Tabla 25: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 10:**

Fecha: 05/05/2016

Tensión normal aplicada: 28 kPa.

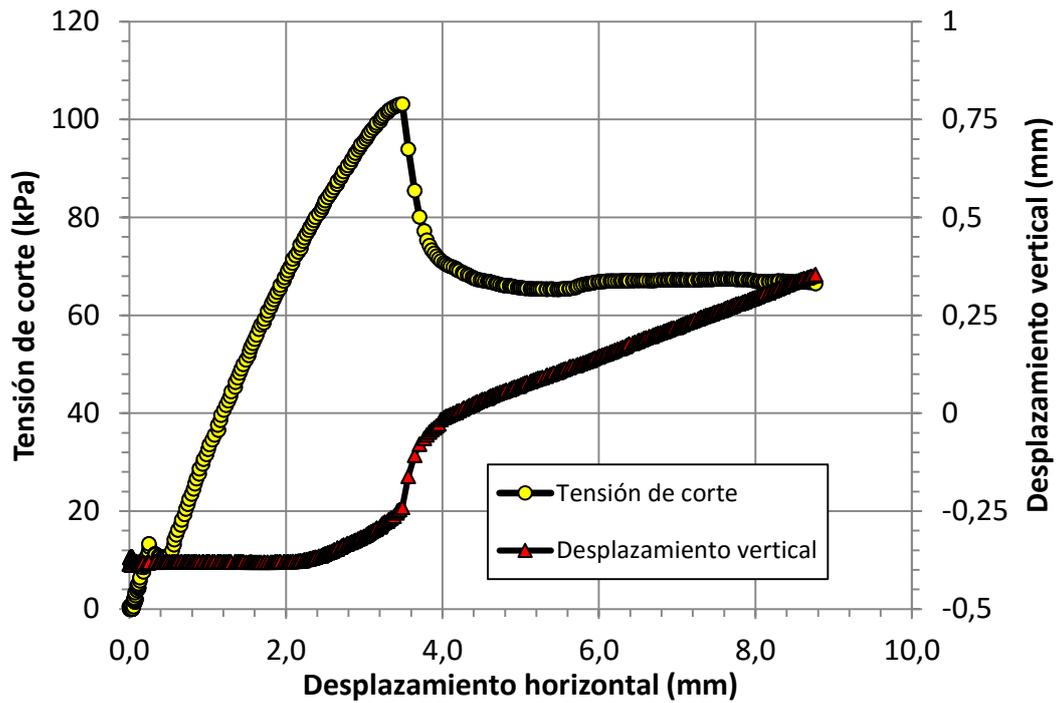


Figura 46: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº10 con tensión normal de 28 kPa.

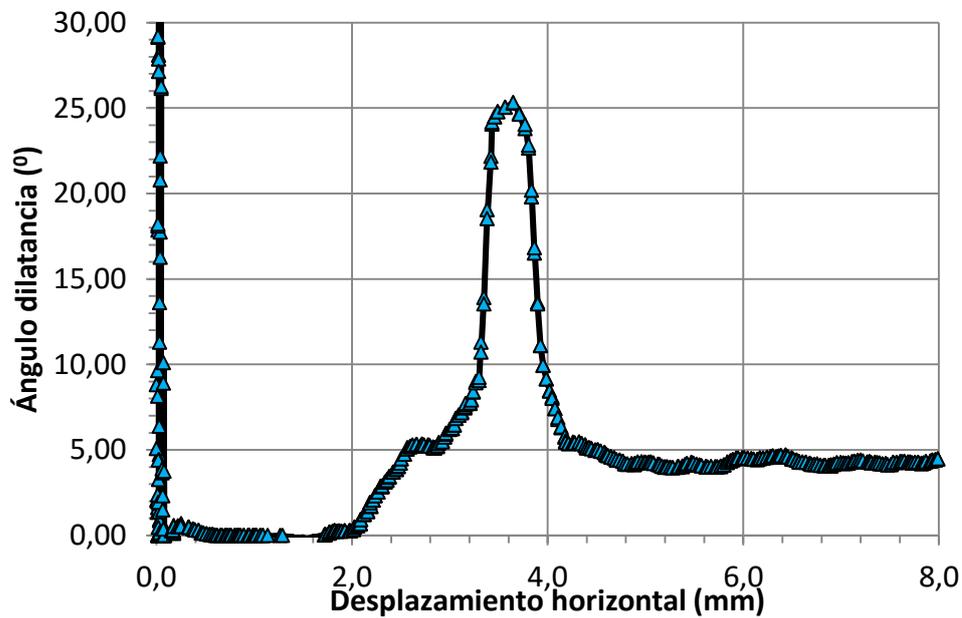


Figura 47: Ángulo de dilatación ( $\Psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº10 con tensión normal de 28 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
28,12	103,15	65,30	3,5	25

Tabla 26: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 11:**

Fecha: 09/05/2016

Tensión normal aplicada: 14 kPa.

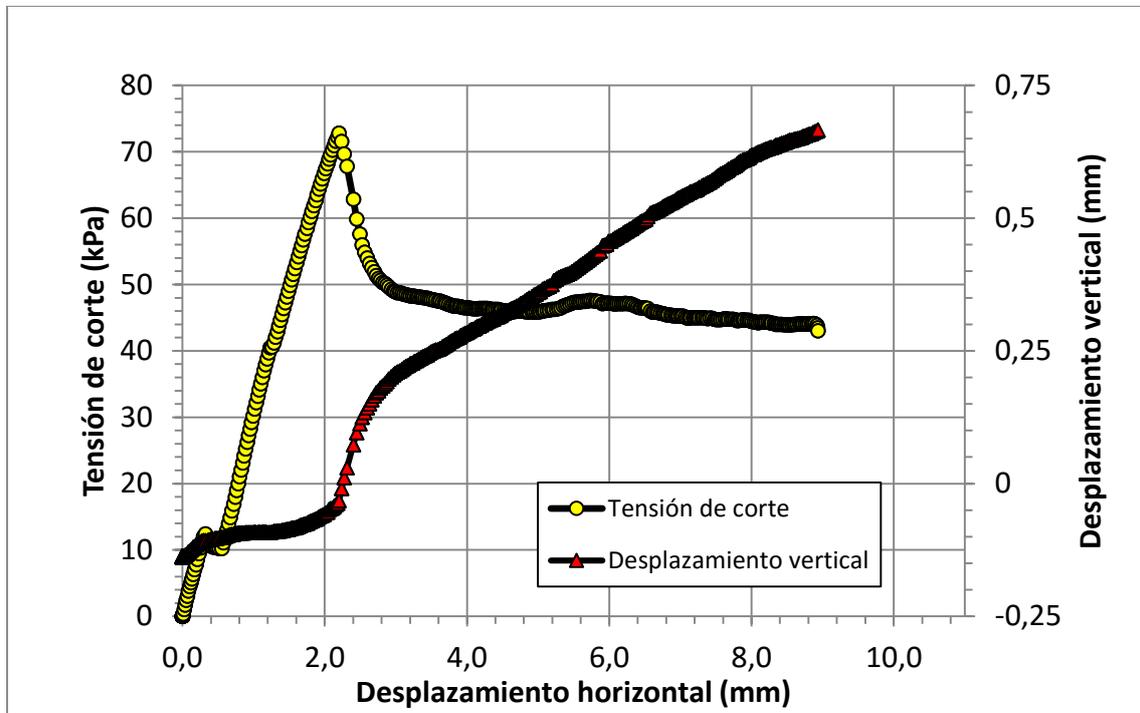


Figura 48: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº11 con tensión normal de 14 kPa.

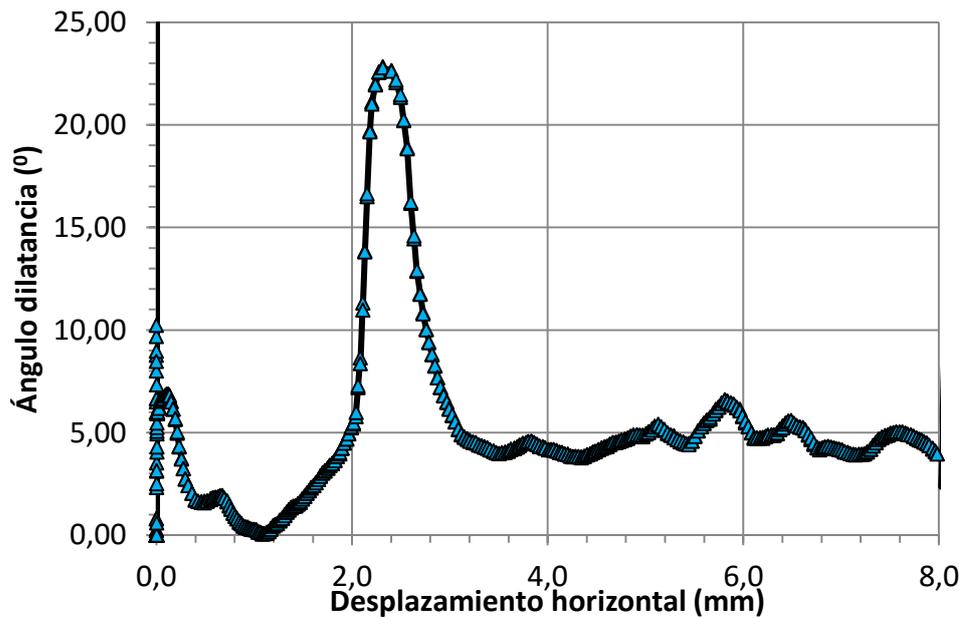


Figura 49: Ángulo de dilatancia ( $\Psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº11 con tensión normal de 14 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
14,07	72,79	45	2,2	22,8

Tabla 27: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 12:**

Fecha: 09/05/2016

Tensión normal aplicada: 22 kPa.

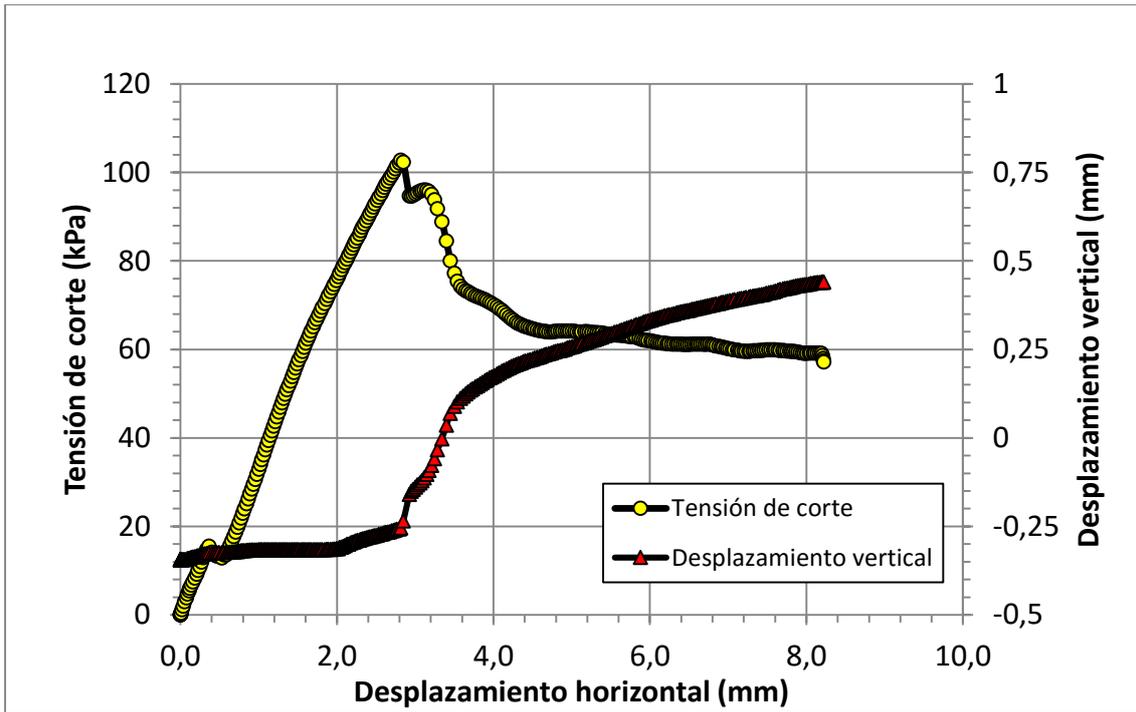


Figura 50: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº12 con tensión normal de 22 kPa.

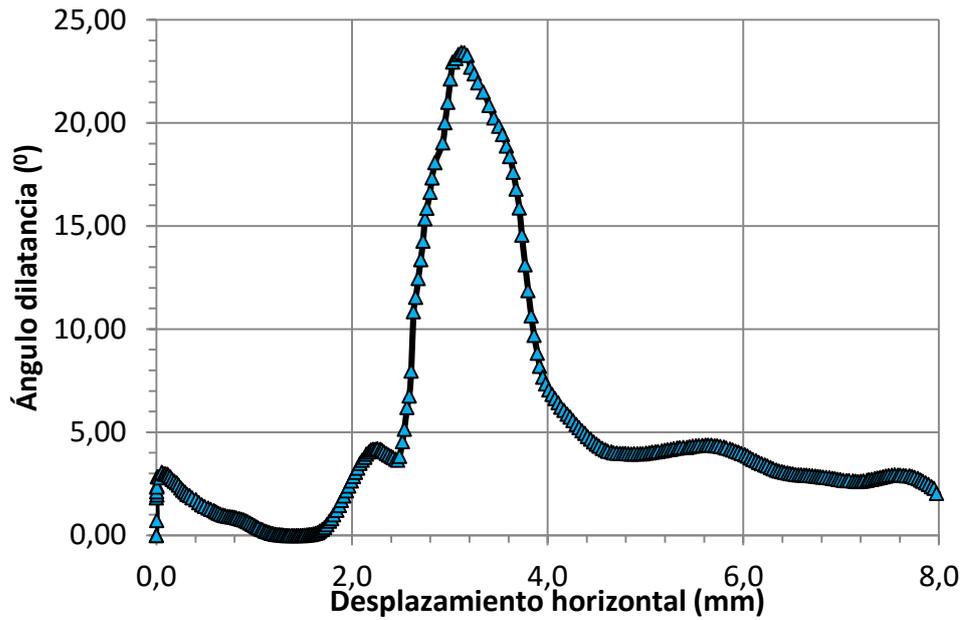


Figura 51: Ángulo de dilatación ( $\psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº12 con tensión normal de 22 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
21,97	102,76	59,2	2,8	23,1

Tabla 28: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 13:**

Fecha: 26/05/2016

Tensión normal aplicada: 1,8 kPa.

Figura 52: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº13 con tensión normal de 1,8 kPa.

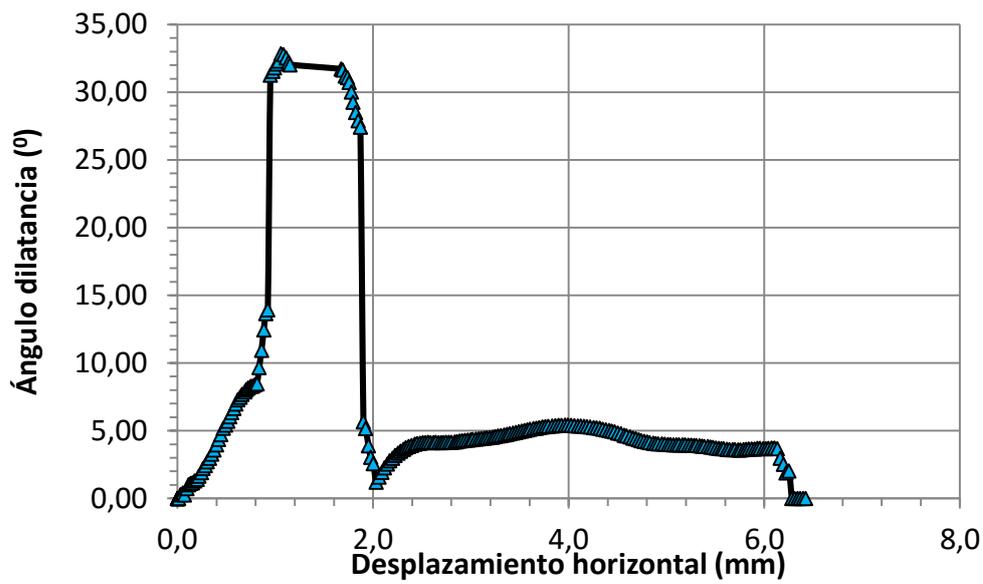


Figura 53: Ángulo de dilatación ( $\psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº13 con tensión normal de 1,8 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$\chi_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
1,80	52,67	50	1,1	32,55

Tabla 29: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 14:**

Fecha: 26/05/2016

Tensión normal aplicada: 3,5 kPa.

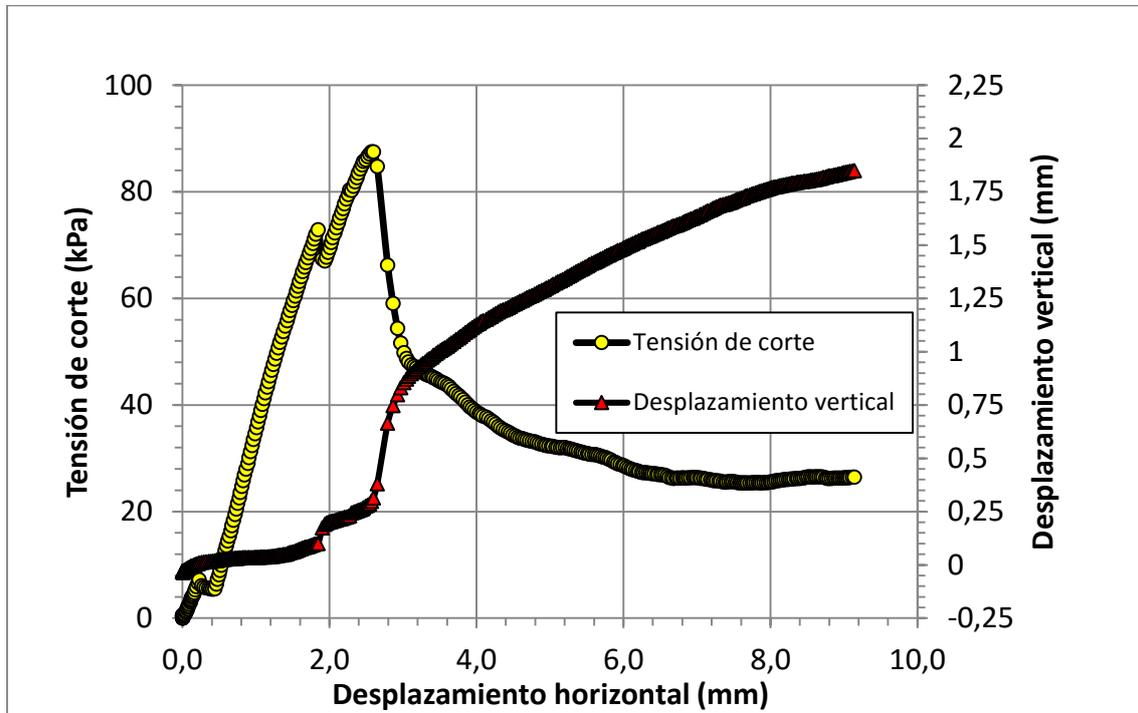


Figura 54: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº14 con tensión normal de 3,5 kPa.

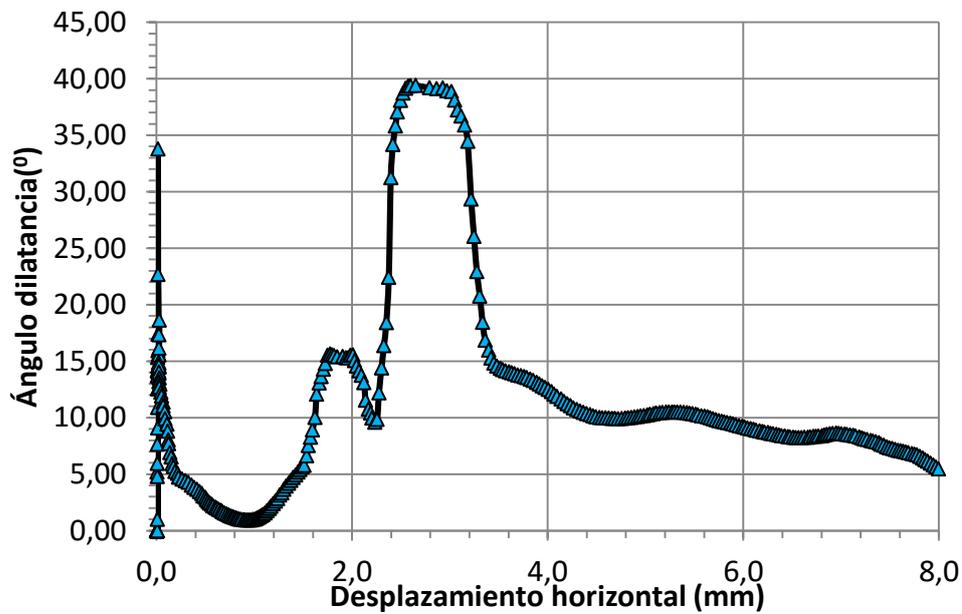


Figura 55: Ángulo de dilatancia ( $\Psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº14 con tensión normal de 3,5 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
3,5	87,48	25,4	2,55	39

Tabla 30: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.

**Ensayo de corte CD nº 15:**

Fecha: 26/05/2016

Tensión normal aplicada: 5,3 kPa.

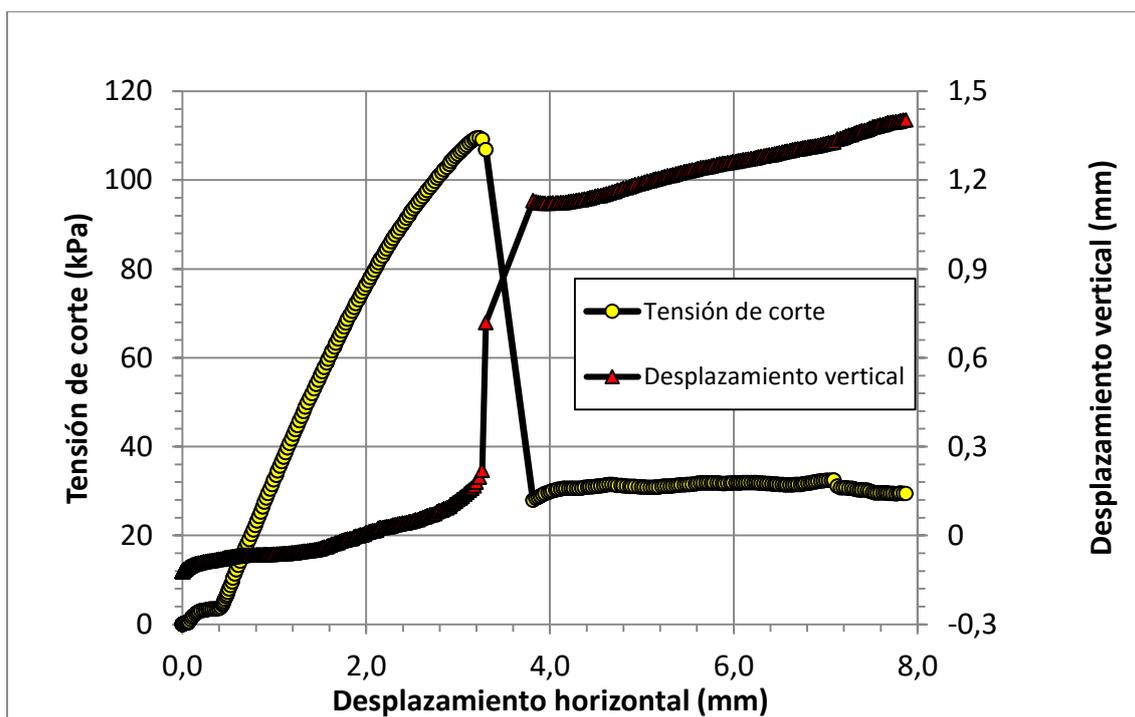


Figura 56: Tensión de corte (kPa) y desplazamiento vertical (mm) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº15 con tensión normal de 5,3 kPa.

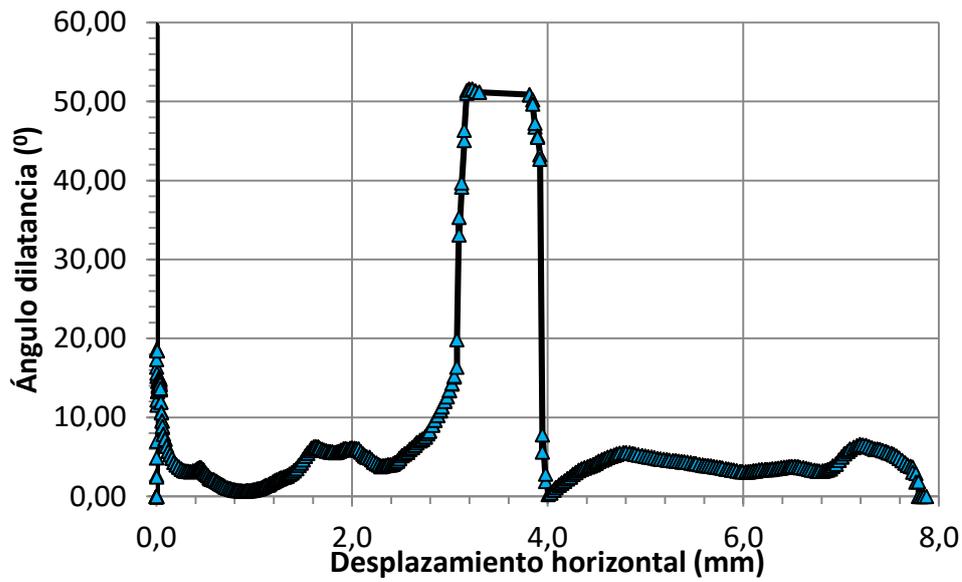
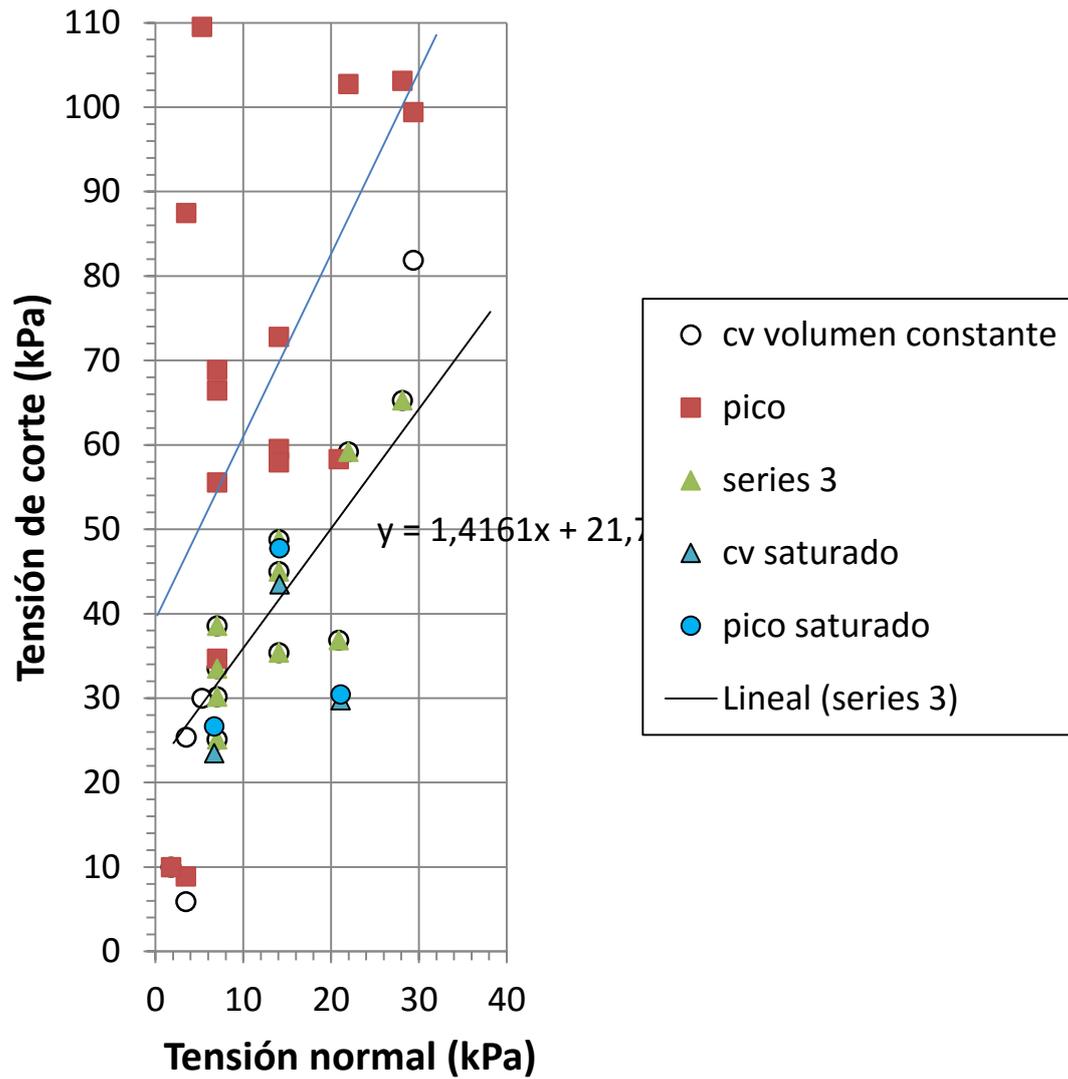


Figura 57: Ángulo de dilatación ( $\psi$ ) en función del desplazamiento horizontal. Ensayo nº15 con tensión normal de 5,3 kPa.

$\sigma_n$ (kPa)	$\tau$ pico (kPa)	$\tau_{cv}$ (kPa)	$X_{pico}$ (mm)	$\psi$ (°)
5,3	109,52	30	3,17	51

Tabla 31: Resultados resistencia de corte pico y a volumen constante, desplazamiento horizontal y ángulo de dilatación pico.



### 3.4.3 Cálculo y análisis de resultados muestra saturada

## 3.5 Ensayo Proctor

## 4. Diseño terraplén experimental

### 4.1 Objetivos

- Toma de mediciones de calidad en condiciones controladas de los futuros deslizamientos superficiales durante 10 meses, de los cuales 5 con condiciones climáticas naturales y los 5 restantes con condiciones artificiales de precipitación.
- Posterior calibración del modelo numérico desarrollado con Elementos Finitos mediante *Code Bright*.
- Comprensión interacción suelo-vegetación-atmósfera para una buena estimación de las infiltraciones en el suelo y proponer futuras medidas correctoras para evitar la erosión de laderas y diseñar soluciones ingenieriles sostenibles.

### 4.2 Requisitos

- Diseñar la pendiente del talud de manera que los deslizamientos superficiales se produzcan progresivamente con el paso de los meses, de manera que se puedan tomar mediciones de todo el proceso para llegar a comprender mejor el mecanismo de rotura debido a la humectación del suelo ante cambios climáticos. Por este motivo, el ángulo elegido para la pendiente del talud debe ser tal que provoque deslizamientos superficiales diferidos en el tiempo, dado que, si no se produce ninguna rotura o esta es muy rápida, no habrá casi información para su posterior procesamiento.
- El espesor a instrumentar será reducido, de 1 metro, al requerir la medición de deslizamientos superficiales. A pesar del pequeño espesor, cada uno de los perfiles estará muy bien instrumentado (ver apartado 6).
- Densidad y rama de compactación necesarias para evitar erosiones durante la construcción. Al utilizarse un suelo limoso debe prestarse atención a la hora de compactar en la rama seca con densidades secas bajas, evitando un índice de poros muy elevado que daría lugar a una succión también elevada. Ésta succión elevada se vería anulada en caso de la saturación del material, con una reducción de la resistencia del suelo y una rotura prematura del talud.
- Dos densidades secas iniciales distintas, una más elevada para el núcleo, igual o superior a  $1.8 \text{ g/cm}^3$ , y otra más reducidas para el metro de suelo a instrumentar, de  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , y dónde se requiere que se desarrollen las roturas.
- Dos partes diferenciadas, una tratada con herbicidas para evitar el crecimiento de plantas, y una con vegetación por determinar.
- 4 perfiles verticales diferentes, dos encarados al sud, de los cuales uno con vegetación y otro sin, y dos encarados al norte también con y sin vegetación para

poder comparar la interacción debida a la vegetación. Cada uno de los perfiles verticales dispondrá de una serie de sensores comentados en el apartado 6 del presente trabajo.

- Una estación meteorológica situada en el centro de la maqueta y en la parte superior con tal de registrar los cambios climáticos durante el tiempo que transcurra el experimento. Detallado en el apartado 6 de instrumentación.

### 4.3 Definición

En la Figura 58 se observa la vista en alzado del terraplén a construir, con la localización de cada uno de los perfiles verticales a instrumentar y para la estación meteorológica.

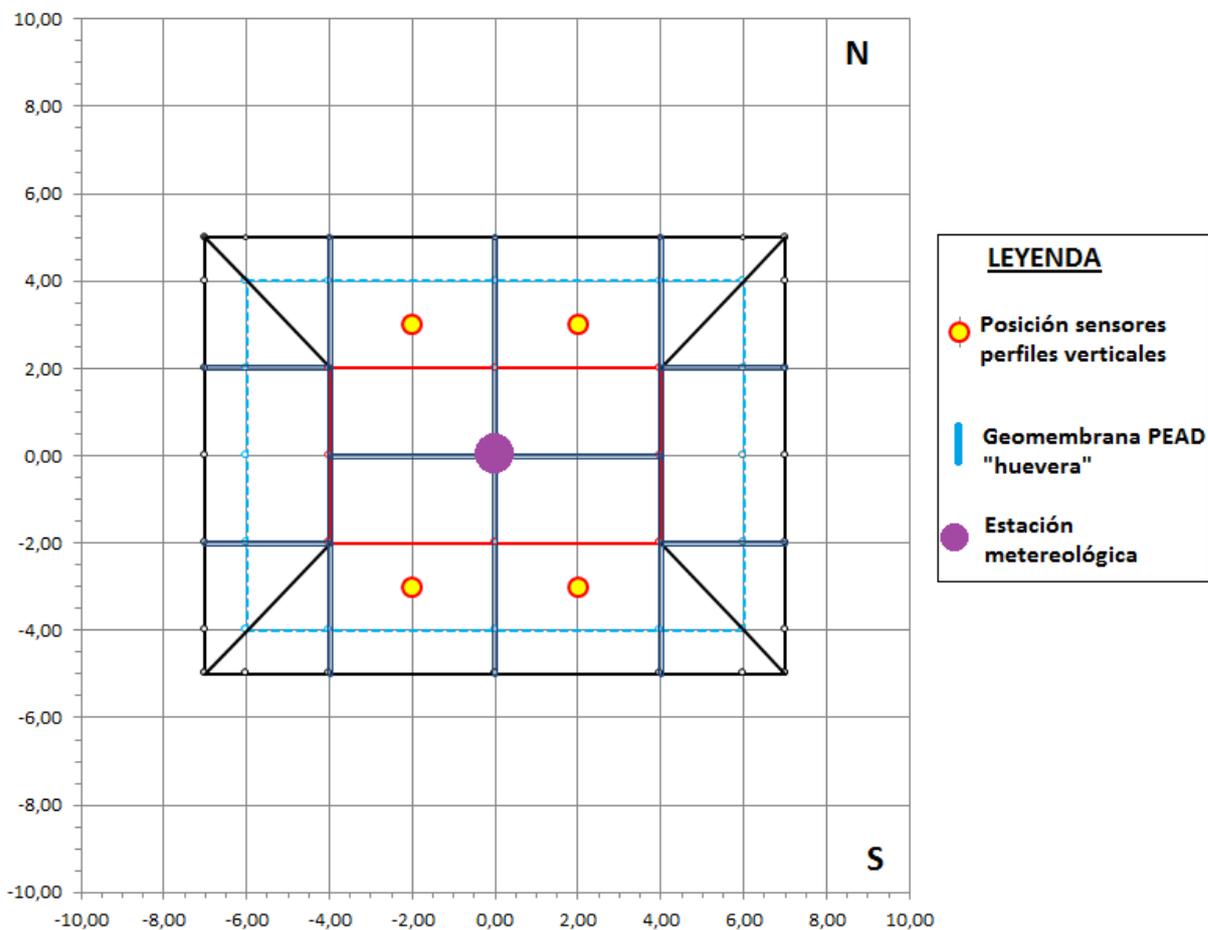


Figura 58: Vista en alzado del terraplén experimental a construir.

En la Figura 59 y 60 se representan los cortes O-E y S-N, con la posición de la geomembrana impermeabilizante en color azul claro, y en la Figura 61 queda definida la zona con y sin vegetación.

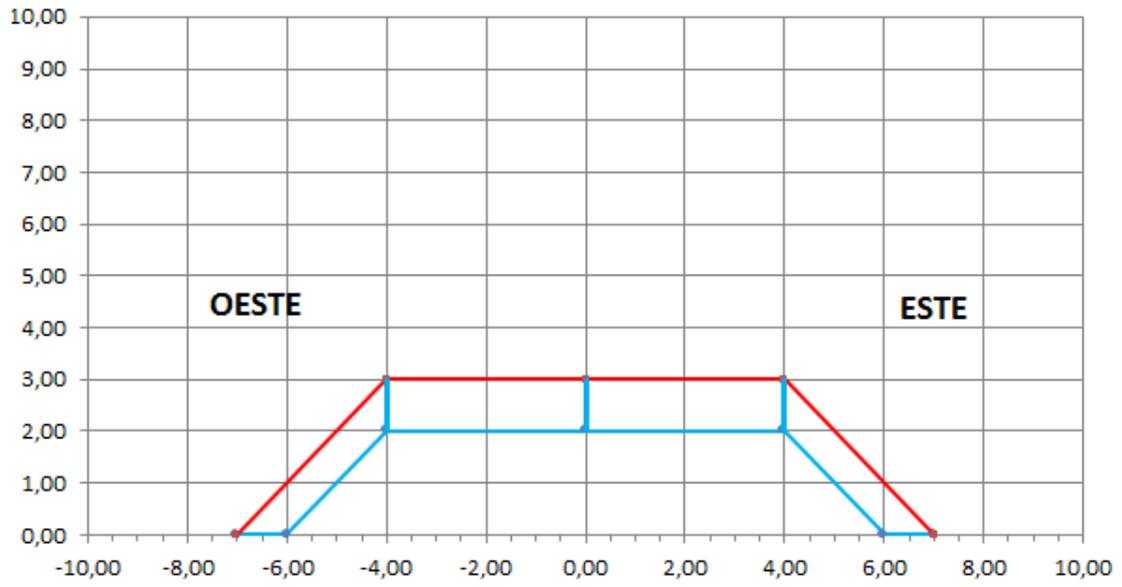


Figura 59: Sección O-E del talud experimental a construir e instrumentar.

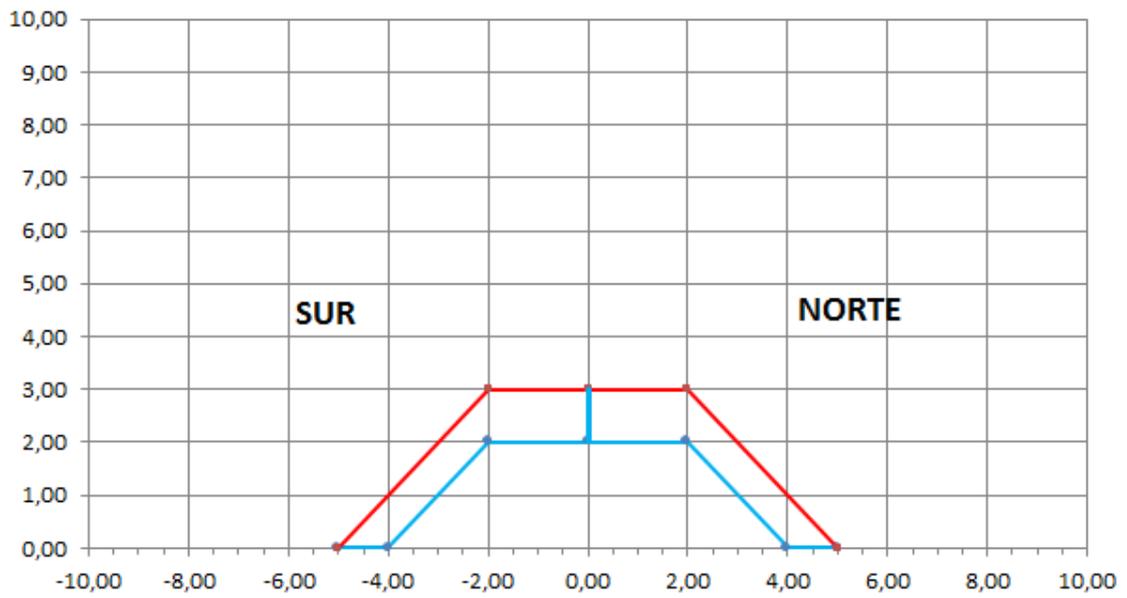
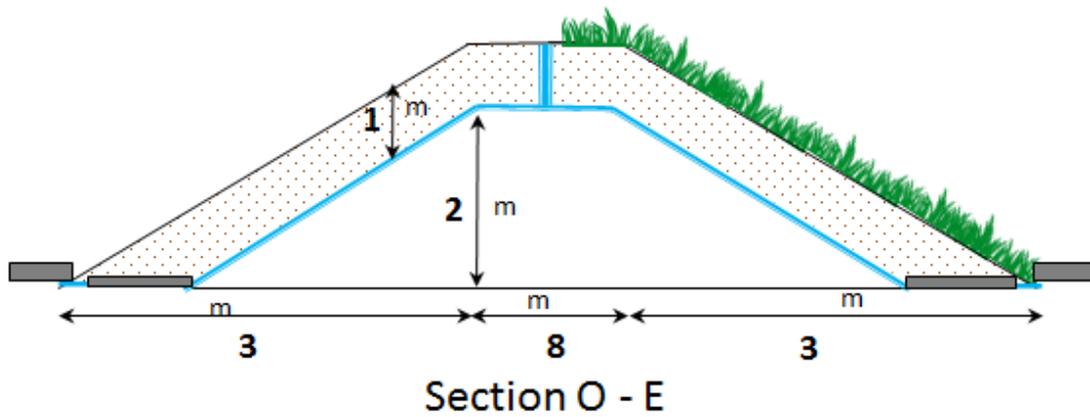


Figura 60: Sección S-N del talud experimental a construir e instrumentar.



*Figura 61: Sección O-E con vegetación en la mitad del talud, orientación Este. La geometría no está a escala.*

## 5. Modelación

### 5.1 Modelo

#### 5.1.1 Condiciones de contorno y condiciones iniciales

### 5.2 Parámetros

### 5.3 Resultados

## 6. Instrumentación

### 6.1 Perfiles verticales:

En la Tabla 32 se resumen los sensores e instrumentos necesarios para cada uno de los perfiles verticales (variables medidas, tipo de conexión, precio y número), y en la en la Figura 62 se muestra su distribución a lo largo del metro de espesor a instrumentar, por encima de la geomembrana impermeable.

Instrumentation in <b>each</b> vertical profile						
Sensor	Variable measured	Conexión	web	Price	N	Subtotal
5TE Decagon	Water content, T, Elec. cond	SDI12	<a href="https://drive.google.com/folderview?i">https://drive.google.com/folderview?i</a>	280,5	<b>3</b>	841,5
T4C Decagon (UMS)	Suction, water pressure	1 Canal	<a href="http://www.ums-muc.de/en/products/soil-water/tensiometer/t4/">http://www.ums-muc.de/en/products/soil-water/tensiometer/t4/</a>	370,2	<b>1</b>	370,2
107 Campbell	Soil temperature	1 Canal	<a href="https://www.campbellsci.com/107">https://www.campbellsci.com/107</a>	74	<b>3</b>	222
MPS-6	Suction	SDI12	<a href="https://drive.google.com/folderview?i">https://drive.google.com/folderview?i</a>	306	<b>2</b>	612
CUP-ANM	Anemómetro de cazoletas con veleta.	Pulsos	<a href="http://www.lab-ferrer.com/sensores/instrumentacion-y-sensores/parametros-ambientales/sensor-para-medir-la-direccion-y-la-velocidad-del-viento.html">http://www.lab-ferrer.com/sensores/instrumentacion-y-sensores/parametros-ambientales/sensor-para-medir-la-direccion-y-la-velocidad-del-viento.html</a>	289	<b>1</b>	289
HFP01	Heat flux	1 Canal	<a href="https://www.campbellsci.com/hfp01">https://www.campbellsci.com/hfp01</a>	435	<b>1</b>	435
PASS VP-4	HR T (over the soil surface)	SDI12	<a href="https://drive.google.com/folderview?id=0Bxs7TC4tj717QXZzNk9PeUICZ2s&amp;usp=sharing">https://drive.google.com/folderview?id=0Bxs7TC4tj717QXZzNk9PeUICZ2s&amp;usp=sharing</a>	379,1	<b>1</b>	379,1
Outdoor box + wires (RS)+.....				150	<b>1</b>	150
					<b>TOTAL</b>	<b>3298,8</b>

Tabla 32: Instrumentación necesaria para cada perfil vertical.

## Vertical profiles:

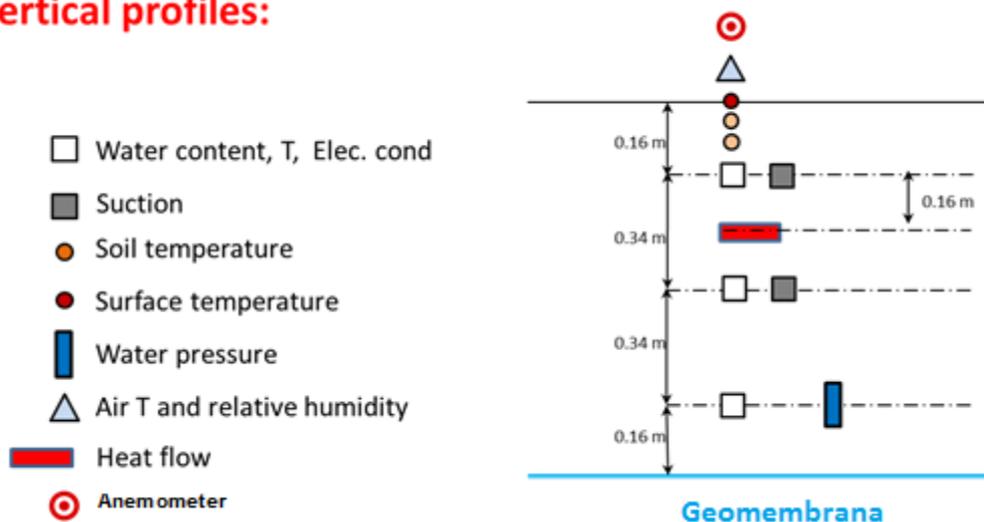


Figura 62: Posición instrumentación en cada uno de los perfiles verticales.

En las figuras siguientes se muestra un resumen de las variables y precisión medidas, el rango, el tiempo de medida, entre otros parámetros importantes para cada uno de los sensores distribuidos a lo largo del perfil.

**Contenido de agua, T, Cond. Elec.  
Sensor: 5TE Decagon Dev.**



<b>ACCURACY</b>	<p>Apparent Dielectric Permittivity (<math>\epsilon_a</math>): <math>\pm 1 \epsilon_a</math> (unitless) from 1 - 40 (soil range), <math>\pm 15\%</math> from 40 - 80</p> <p>Soil Volumetric Water Content (VWC): Using Topp equation: <math>\pm 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3</math> (<math>\pm 3\%</math> VWC) typical in mineral soils that have solution electrical conductivity <math>&lt; 10 \text{ dS/m}</math>; using medium specific calibration, <math>\pm 0.01 - 0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3</math> (<math>\pm 1 - 2\%</math> VWC) in any porous medium</p> <p>Electrical Conductivity (EC): <math>\pm 10\%</math> from 0 to 7 dS/m, user calibration required above 7 dS/m</p> <p>Temperature: <math>\pm 1^\circ\text{C}</math></p>
<b>RESOLUTION</b>	<p><math>\epsilon_a</math>: 0.1 <math>\epsilon_a</math> (unitless) from 1 - 20, <math>&lt; 0.75 \epsilon_a</math> (unitless) from 20 - 80</p> <p>VWC: 0.0008 <math>\text{m}^3/\text{m}^3</math> (0.08% VWC) from 0 to 50% VWC</p> <p>EC: 0.01 dS/m from 0 to 7 dS/m, 0.05 dS/m from 7 to 23.1 dS/m</p> <p>Temperature: 0.1 <math>^\circ\text{C}</math></p>
<b>RANGE</b>	<p><math>\epsilon_a</math>: 1 (air) to 80 (water)</p> <p>EC: 0 - 23 dS/m (bulk)</p> <p>Temperature: <math>-40 - 60^\circ\text{C}^*</math></p> <p>*Sensors can be used at higher temperatures under some conditions. Contact Decagon for more details.</p>
<b>MEASUREMENT TIME</b>	150 ms
<b>SENSOR TYPE</b>	<p>VWC: Frequency domain</p> <p>EC: Two probe design</p> <p>Temperature: Thermistor</p>

*Figura 63: Especificaciones técnicas sensor 5TE Decagon.*



## Succión Sensor: MPS6 Decagon Dev.



<b>ACCURACY</b>	Soil Water Potential: $\pm(10\% + 2 \text{ kPa})$ from -9 to -100 kPa (see manual for additional accuracy specifications past -100 kPa) Soil Temperature: $\pm 1^\circ\text{C}$
<b>RESOLUTION</b>	Soil Water Potential: 0.1 kPa Soil Temperature: 0.1°C
<b>RANGE</b>	Soil Water Potential: -9 to -100,000 kPa Soil Temperature: -40° to 60°C* *Sensors can be used at higher temperatures under some conditions. Contact Decagon for more details.
<b>MEASUREMENT SPEED</b>	150 ms (milliseconds)
<b>EQUILIBRATION TIME</b>	10 min to 1 hr depending on soil water potential
<b>SENSOR TYPE</b>	Frequency domain with calibrated ceramic discs, thermistor

Figura 64: Especificaciones técnicas sensor MPS6 Decagon.



## Presión del agua Sensor: STCP-850, SDEC

<b>Measuring range</b> : 0 Hpa to -999 Hpa.
<b>Ceramic</b> : screwable ceramic, ref. SDEC 2150E.
<b>Water refilling</b> : by two nylon capillaries.
<b>Accuracy</b> : better than 1% of full scale.
<b>Pressure sensor</b> : differential pressure type with integrated temperature compensation.
<b>Offset</b> : factory calibrated. Each sensor is delivered with an individual calibration certificate.
<b>Measuring process</b> : sensor's measurement at the bottom of the tensiometric tube = direct measurement of matric potential.
<b>Output</b> : On cable across nickel stuffing box.
<b>Power supply</b> : direct current: +6 to +15 Volts.
<b>Temperature compensation</b> : -10°C to +50°C.
<b>Weight</b> : 185 grammes.
<b>Operating temperature</b> : -10°C à + 50°C.

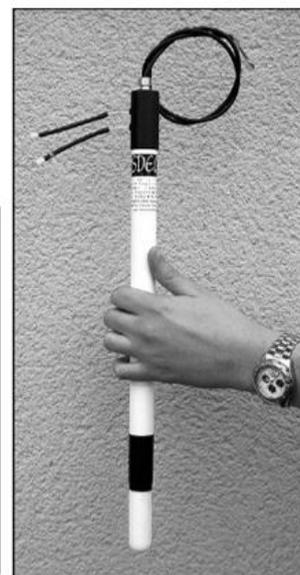


Figura 65: Especificaciones técnicas sensor STCP-850 SDEC.

△ **Temperatura aire y humedad relativa**  
**Sensor: Pass VP-3, ICT int.**



Humidity Resolution	0.1% RH
Temperature Resolution	0.1°C
<b>VAPOR PRESSURE RESOLUTION</b>	0.01 kPa
Humidity Range	0-100% RH
Temperature Range	-40°C to 80°C
<b>VAPOR PRESSURE RANGE</b>	0-47 kPa
Sensor Type	Digital Capacitance and Thermistor

Figura 66: Especificaciones técnicas sensor Pass VP-3 de ICT.

● ● **Temperatura del suelo y de la superficie**  
**Sensor: 107 Campbell**



<b>Sensor Element:</b>	Measurement Specialties 100K6A1iA thermistor
<b>Survival Range:</b>	-50 to 100 °C
<b>Measurement Range:</b>	-35 to 50 °C
<b>Time Constant in Air:</b>	30 to 60 s in a wind speed of 5 m/s
<b>Maximum Cable Length:</b>	1000 ft
<b>Accuracy<sup>1</sup></b>	
<b>Worst case:</b>	±0.4 °C (-24 to 48 °C) ±0.9 °C (-35 to 50 °C)

Figura 67: Especificaciones técnicas sensor 107 Campbell.



**Flujo de calor  
sensor: HFP01 Campbell**



### Specifications

#### General

Sensor Type	Thermopile
Sensitivity	50 $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^{-2}$ (nominal)
Nominal Resistance	2 $\Omega$
Temperature Range	-30° to +70°C
Sensor Thermal Resistance	$< 6.25 \times 10^{-3} \text{ K m}^2 \text{ W}^{-1}$
Measurement Range	$\pm 2000 \text{ W m}^{-2}$
Expected Typical Accuracy	Within -15% to +5% in most common soils (12 hour totals)
Plate Diameter	80 mm (3.15 in.)
Plate Thickness	5 mm (0.20 in.)
Weight	200 g (7.05 oz) without cable

*Figura 68: Especificaciones técnicas sensor HFP01 de Campbell.*

## 6.2 Datalogger



Figura 69: Datalogger elegido para la recogida de datos.

## 6.3 Estación meteorológica

En la Tabla 33 se resumen los sensores de la estación meteorológica

Meteo station					
Sensor	Variable measured	Conexión	web	N	Subtotal
RAIN-O-MATIC 0.2M	Pluviómetro de 0.2mm de resolución	pulsos	<a href="http://www.lab-ferrer.com/sensores/instrumentacion-y-sensores/parametros-ambientales/pluviometro.html">http://www.lab-ferrer.com/sensores/instrumentacion-y-sensores/parametros-ambientales/pluviometro.html</a>	1	180
NR-LITE2	Radiómetro neto	1 canal	<a href="https://www.campbellsci.com/nr-lite2">https://www.campbellsci.com/nr-lite2</a>	1	1341
PYR+SOP	Sensor para medir la Radiación Solar SP-110		<a href="http://www.apogeeinstruments.co.uk/apogee-pyranometer-technical-information/">http://www.apogeeinstruments.co.uk/apogee-pyranometer-technical-information/</a>	0	455
Armario estanco+ soporte (RS)				1	50
				<b>TOTAL</b>	<b>2026</b>

Tabla 33: Sensores de la estación meteorológica situada en el centro del terraplén.

**6.4 Cámaras digitales + accesorios**

**6.5 Imágenes termales**

**6.6 Bomba de agua**

**6.7 Medidor caudal**

**7. Conclusiones**

## Referencias

- Apuntes asignatura Mecánica de Suelos del Máster en Ingeniería del Terreno
  - Estructura y propiedades básicas de los suelos. Identificación y clasificación.
  - Ensayos de resistencia en suelos.
  - Comportamiento mecánico suelos saturados.
  - Introducción a los suelos no saturados.
  - Los ensayos de compactación.
- UNE-103103-1994: Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.
- UNE-103104-1993: Determinación del límite plástico de un suelo.
- UNE 103302-1994: Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.
- UNE 103300-1993: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.
- Manual Code\_Bright v5.4  
([https://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code\\_bright/downloads](https://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code_bright/downloads))
- Manual tensiómetro UMS T5x (<http://www.ums-muc.de/en/products/soil-water/tensiometer/t5x/>)
- H . Rahardjo, R . B . Rezaur, E . C . Leong, E . E . Alonso, A . Lloret, and A . Gens: Monitoring and modeling of slope response to climate changes (2008)