

Análisis del comportamiento de arenas medias mediante la mesa de corte directo y las diferentes tipologías de ensayo.

Alumno: EMILIO PEDRERO HUETE
Directores: IVAN ALHAMA MANTECA
GONZALO GARCÍA ROS

Agradecimientos

Primero me gustaría dar las gracias al director de este proyecto, Iván Alhama Manteca y al codirector, Gonzalo García Ros. Han estado siempre cuando les he necesitado para cualquier duda o consulta del proyecto.

Agradecer a los Laboratorios Horysu los ensayos de corte directo que nos prestaron para poder compararlos y analizarlos con los nuestros.

Agradecer también a mi compañero Jesús Hidalgo, el cual me ha echado una mano a la hora de la preparación de las muestras y poner en marcha los ensayos.

Por último, después de siete años de mucho esfuerzo, agradecer a toda mi familia por apoyarme en los momentos duros.

Índice

1	Introducción y objetivos.....	1
2	Fundamentos teóricos.....	2
2.1	Resistencia al corte del terreno.....	2
2.2	El ensayo de corte directo	4
2.3	La norma UNE... ..	7
3	Aparatos de laboratorio para ejecución de ensayos y preparación de muestras	16
3.1	El aparato de corte directo.....	16
3.2	Módulo de adquisición de datos Cyber-plus y software Shearlab	18
3.3	Material para preparación de muestras y otros ensayos	26
4	Pruebas de laboratorio.....	28
4.1	Selección de muestras	28
4.2	Medidas iniciales, elección del ensayo y programación de la velocidad de rotura	28
4.3	Metodología de ejecución de los ensayos	32
4.4	Ensayos	36
4.4.1	Arena suelta seca.....	36
4.4.2	Arena suelta saturada	39
4.4.3	Arena compacta seca.....	41
4.4.4	Arena compacta húmeda	42
4.4.5	Arena compacta saturada.....	44
4.4.6	Arena compacta seca con varias pasadas	46
5	Discusión de resultados.....	50
6	Conclusiones y comentarios finales	61
7	Referencias	62

1 Introducción y objetivos

El objetivo del presente proyecto es analizar el comportamiento de arenas sueltas y compactas mediante la mesa de corte directo, con la cual se intenta conseguir la rotura de una muestra según un plano determinado, con el fin de poder conocer experimentalmente los parámetros de cohesión y ángulo de rozamiento que definen la resistencia del suelo granular.

Otro de los objetivos será aprender a usar el módulo de adquisición de datos para la traducción de las deformaciones y tensiones soportadas por la muestra durante el ensayo y aprender a usar un software que permite, mediante el tratamiento de los datos obtenidos, la elaboración de un informe completo.

Para conocer el comportamiento de las arenas, se realizarán los ensayos modificando las condiciones de la arena. Se estudiarán los siguientes casos: arena suelta seca, arena suelta saturada, arena compacta seca, arena compacta saturada, arena compacta húmeda y arena compacta seca con varias pasadas. Se le aplicará diferentes estados de carga: 1 kg, 2 kg, 4kg y 8 kg, realizando un total de 24 ensayos.



Imagen 1. Mesa de corte directo

2 Fundamentos teóricos

2.1 Resistencia al corte del terreno

Si alteramos 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).

La resistencia al corte del suelo 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:

- τ = resistencia al corte del terreno a favor de un determinado plano
- σ_n = tensión total normal actuando sobre el mismo plano
- u = presión intersticial
- c' = cohesión efectiva
- ϕ' = ángulo de rozamiento interno efectivo,

La ecuación anterior representa una recta en el espacio (σ', τ) , que a menudo se denomina línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura del suelo (Figura 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 2.1) se pueden deducir algunos aspectos interesantes:

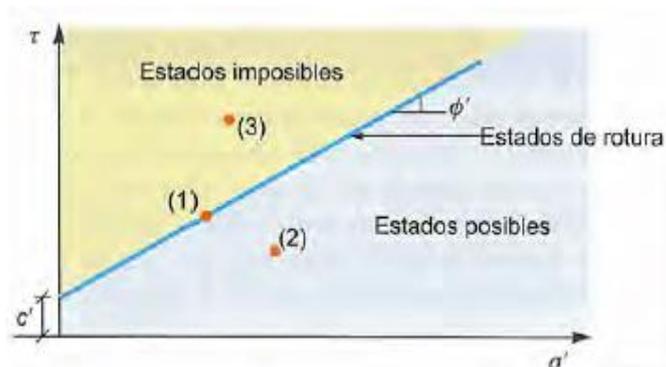


Figura 2.1 Criterio de rotura en suelo (González de Vallejo, Ingeniería Geológica)

- 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 2.1 representa un estado de rotura.
- El punto (2) representa una combinación (σ' , τ) 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 situado encima de la envolvente de rotura, lo que significa que se ha sobrepasado la combinación máxima (σ' , τ) del criterio de rotura, y por lo tanto no es compatible con la resistencia definida del suelo.

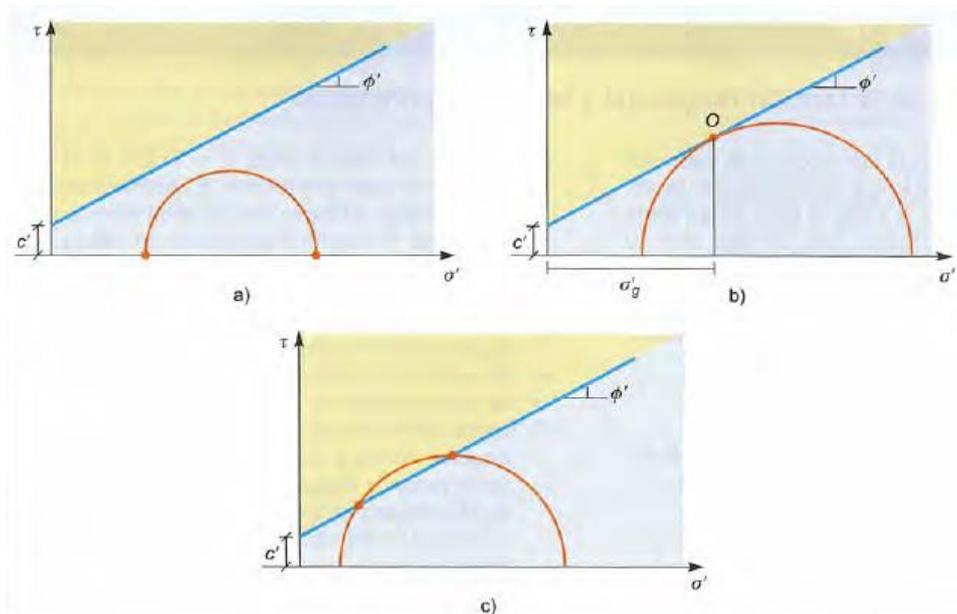


Figura 2.2 La envolvente de rotura y el círculo de Mohr (González de Vallejo, Ingeniería Geológica)

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) se han representado tres Círculos de Mohr en el espacio (σ', τ) , que en principio representarían tres estados tensionales de un elemento de suelo. Si los parámetros de resistencia al corte del suelo (c', ϕ') 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 (σ'_f, τ_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 (σ', τ) 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.

2.2 El ensayo de corte directo

Consiste en 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. El aparato de ensayo se representa esquemáticamente en la Figura 2.3.

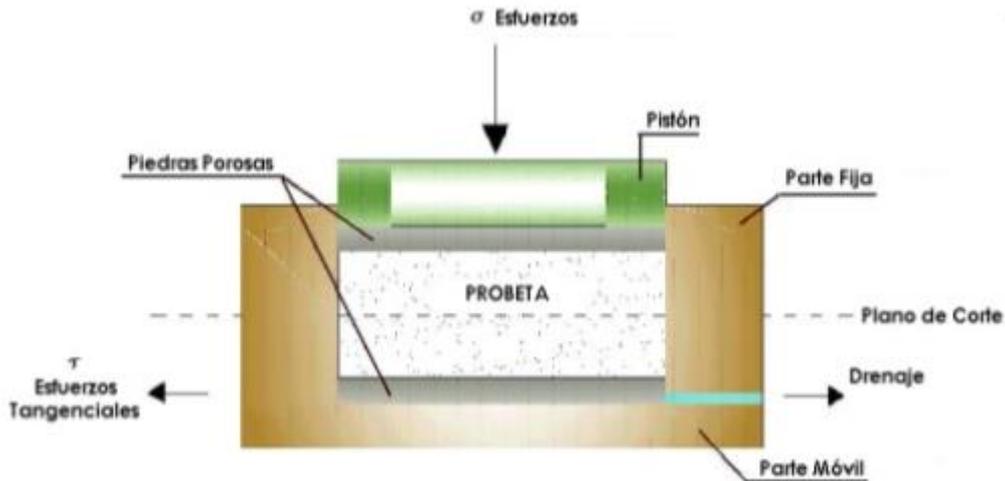


Figura 2.3 Esquema del aparato de corte directo.

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:

- 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 (τ) 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 (δv), 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 cm² para cajas de L = 6 cm de lado).

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

ΔH es el desplazamiento vertical (positivo si es un acortamiento).

ΔV 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:

1. Se aplica una tensión total vertical N_1 .
2. 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.
3. 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:

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

4. 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, (σ_{n2}) y (σ_{n3}).

Con relación a la movilización de resistencia al corte, en la Figura 2.8 se muestran cualitativamente los resultados de un ensayo drenado completo como el descrito. En abscisas se representa el desplazamiento horizontal (Δx) de la parte inferior de la caja de corte y en ordenadas la tensión tangencial (τ) medida para cada valor de dicho desplazamiento. En la Figura 2.8 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 (τ).
- 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.

Ventajas e inconvenientes del ensayo de corte directo

Las principales ventajas son:

- 1- Es un ensayo rápido y barato.
- 2- Sus principios básicos son elementales
- 3- La preparación de las muestras es sencilla.
- 4- Con cajas de corte grandes se pueden ensayar materiales de grano grueso.
- 5- Con algunas modificaciones se pueden emplear los mismos principios para determinar la resistencia de discontinuidades en roca, contacto hormigón-suelo, etc.
- 6- Se puede emplear para medir la resistencia residual en arcillas.

En cuanto a las limitaciones cabe citar:

- 1- La superficie de rotura es obligada.
- 2- La distribución de tensiones en la superficie de corte no es uniforme.
- 3- No se pueden medir en general presiones intersticiales, de manera que la única manera de controlar el drenaje es variando la velocidad de desplazamiento horizontal.
- 4- El área de contacto del plano de corte disminuye a medida que se produce el desplazamiento horizontal relativo entre ambas mitades de la caja.

2.3 La norma UNE 103401

1) Objetivo y campo de aplicación

Esta norma tiene por objetivo la determinación de los parámetros resistentes, cohesión, c , y ángulo de rozamiento interno, ϕ , de una muestra de suelo sometida a esfuerzo cortante. También se pueden obtener los parámetros de resistencia residual c_R y ϕ_R .

Normalmente el ensayo se realiza sobre tres probetas de una misma muestra de suelo, sometida cada una de ellas a una presión normal diferente, obteniéndose la relación entre la tensión tangencial en la rotura y la tensión normal aplicada.

2) Modalidades de ensayo que contempla esta norma

Tipos de ensayo:

- Ensayo consolidado-drenado (CD). Se aplica la presión normal, permitiendo el drenaje del suelo hasta finalizar la consolidación primaria. A continuación, se produce a la rotura de la probeta a una velocidad lo suficiente lenta como para

que no se originen presiones intersticiales, permitiendo el libre drenaje del agua de los poros (es aplicable tanto a suelos cohesivos como regulares). De este ensayo se obtienen los parámetros resistentes efectivos, cohesión efectiva, c' , y ángulo de rozamiento interno efectivo, ϕ' .

- Ensayo consolidado-no drenado (CU). Se aplica la presión normal, permitiendo el drenaje del suelo hasta finalizar la consolidación primaria. A continuación, se produce a la rotura de la probeta a una velocidad lo suficiente rápida para que no se produzca el drenaje (es aplicable a suelos cohesivos). De este ensayo se obtienen los parámetros resistentes, c_{cu} y ϕ_{cu} .
- Ensayo no consolidado-no drenado (UU). La rotura se inicia nada más aplicar la presión normal correspondiente y a una velocidad lo suficientemente rápida para que no se produzca el drenaje (es aplicable a suelos cohesivos). De este ensayo se obtienen los parámetros resistentes, c_u y ϕ_u .
- Ensayo con varias pasadas después de la rotura. Se somete la probeta de suelo a varias pasadas una vez finalizado el ensayo normal, para determinar así los parámetros resistentes residuales c_R y ϕ_R .

3) Operaciones y medidas iniciales

Antes de empezar el ensayo es necesaria la realización de las siguientes operaciones:

- Comprobación de que los componentes de la caja de corte están limpios y secos.
- Montaje de las dos mitades de la caja de corte, asegurándolas mediante los tornillos pasadores. Se debe colocar la placa base acanalada dentro de la caja.

Periódicamente se deben efectuar las siguientes medidas:

- Masa de la mitad superior de la caja de corte, m_c , con una precisión de 0,01g.
- Masa del tallador, m_t , con una precisión de 0,01g.
- Altura del tallador, h_t , con una precisión de 0,1mm.
- Altura de la mitad superior de la caja de corte, h_c , con una precisión de 0,1mm.
- Dimensiones interiores, L_1 y L_2 de la caja cuadrada de corte, o el diámetro, D , de la caja circular de corte, con una precisión de 0,1mm.
- Área inicial de la probeta, A , en mm^2 .

- Profundidad media, h_1 , desde el borde superior de la caja de corte hasta la placa base acanalada, con una precisión de 0,1mm.
- Espesores de cada placa porosa, y de cada placa ranurada que se vayan a utilizar en el ensayo, con una precisión de 0,1mm. Se calcula el espesor total de las placas usadas en el ensayo, h_t , con una precisión de 0,1 mm.

4) Preparación y montaje de las probetas para el ensayo

El procedimiento de preparación de la probeta depende del tipo de suelo, pudiéndose ensayar tanto suelos cohesivos (arcillosos), como suelos no cohesivos (arenosos).

Durante la preparación y tallado de la probeta se deben evitar en lo posible las pérdidas de humedad, realizando estas operaciones en cámara húmeda si fuese necesario.

Normalmente se preparan tres probetas similares, a partir de suelo, para realizar tres ensayos, en los que se somete a cada probeta a una presión normal diferente.

Suelos no cohesivos (arenosos)

El procedimiento de preparación depende de que el suelo esté seco y se pueda verter directamente, que esté húmedo y se tenga que compactar, o que esté saturado.

Arena seca floja. La muestra de suelo recibida en el laboratorio se desmenuza y se deseca en la estufa a menos de 60° hasta masa constante, retirando cualquier partícula de tamaño superior al máximo permitido 1/ 10 de la altura de la probeta.

Se deja enfriar en un desecador, se toma la cantidad suficiente para preparar una probeta y se determina su masa con una precisión de 0,01g.

Se sitúa, dentro de una bandeja, la caja de corte montada con la placa base acanalada y una ranurada sin orificios, son las ranuras dispuestas hacia arriba y el sentido de estas perpendicular a la dirección de corte.

Se vierte la arena dentro de la caja de corte hasta llenarla, procurando que caiga desde una pequeña altura, para evitar que compacte.

Se enrasa la superficie de la arena hasta que se consiga una altura determinada, retirando el material que fuera necesario para lograr esto.

Se recoge todo este material y se determina su masa con una precisión de 0,01g para calcular, por diferencias, la masa seca inicial de la probeta, m_{di} .

Se coloca la placa ranurada sin orificios, con las ranuras hacia abajo, es decir en contacto con la probeta de suelo y con la dirección de éstas perpendicular a la de corte, procurando dentro de lo posible que dicha placa quede horizontal.

Se mide la distancia, h_3 , desde el borde de la parte superior de la caja de corte hasta la superficie de la placa ranurada, con precisión, de 0,1 mm.

Se coloca cuidadosamente sobre aquella el pistón de carga, evitando cualquier movimiento.

Arena seca compacta. La muestra de suelo recibida en el laboratorio se desmenuza y se deseca en la estufa a menos de 60° hasta masa constante, retirando cualquier partícula de tamaño superior al máximo permitido 1/ 10 de la altura de la probeta.

Se deja enfriar en un desecador, se toma la cantidad suficiente para preparar una probeta y se determina su masa con una precisión de 0,01g

Sobre una superficie rígida se sitúa una bandeja, dentro de esta la caja de corte montada con la placa base acanalada y una placa ranurada son orificios, con las ranuras hacia arriba y el sentido de estas perpendicular a la dirección de corte.

Se vierte la arena dentro de la caja de corte (una cantidad determinada si se desea conseguir una cierta densidad seca), y se aplica con la maza Arny un determinado esfuerzo de compactación, hasta alcanzar la densidad deseada. Se pueden utilizar otros métodos de compactación alternativa, como vibración, compactación estática o dejando caer la arena lentamente desde unos 400mm.

Se enrasa la superficie de la arena hasta que se consiga una altura determinada, retirando el material que fuera necesario para lograr esto.

Se recoge todo este material y se determina su masa con una precisión de 0,01g para calcular, por diferencias, la masa seca inicial de la probeta, m_{di} .

Se coloca la placa ranurada sin orificios, con las ranuras hacia abajo, es decir en contacto con la probeta de suelo y con la dirección de esta perpendicular a la de corte, procurando dentro de lo posible que dicha placa quede horizontal.

Se mide la distancia, h_3 , desde el borde de la parte superior de la caja de corte hasta la superficie de la placa ranurada, con precisión, de 0,1 mm.

Se coloca cuidadosamente sobre aquella el pistón de carga, evitando cualquier movimiento.

Arena parcialmente saturada. La muestra de suelo recibida en el laboratorio se desmenuza y se deseca en la estufa a menos de 60° hasta masa constante, retirando cualquier partícula de tamaño superior al máximo permitido 1/ 10 de la altura de la probeta.

Se deja enfriar en un desecador, se toma la cantidad suficiente para preparar una probeta y se determina su masa con una precisión de 0,01g.

Mediante cálculo se determina la cantidad de agua necesaria para conseguir la humedad deseada. Se añade al suelo y se mezcla perfectamente para homogenizar la humedad. Se toma una pequeña cantidad para verificar la humedad.

Se coloca la caja de corte sobre una superficie rígida, montada con la placa base acanalada, la placa porosa y la placa ranurada con orificios con las ranuras hacia arriba y la dirección de estas perpendicular a la de corte. Se procede a la compactación con la maza Army, siguiendo el método ya descrito para la arena seca compactada.

Se iguala la superficie de la probeta de suelo con el enrasador.

Se recoge toda la arena sobrante, se deseca en estufa a menos de 60°C hasta masa constante, se deja enfriar en un desecador y se determina su masa con una precisión de 0,01g, para calcular, por diferencia, la masa seca inicial de la probeta, m_{di} .

Se coloca la placa ranurada con orificios sobre la probeta de suelo, con las ranuras en contacto con este y la dirección de aquellas perpendicular a la de corte. Se empuja la placa ranurada hacia abajo para que encaje perfectamente, procurando dentro de lo posible que el conjunto quede horizontal.

Se mide la distancia, h_3 , desde el borde superior de la caja de corte hasta la superficie de la placa ranurada, con una precisión de 0,01mm.

Se coloca sobre el conjunto una placa porosa y el pistón de carga.

5) Procedimientos operatorios

En función de cada tipo de ensayo:

Ensayo consolidado-drenado

Ajustes iniciales. Se coloca el carro de deslizamiento con la caja perfectamente ensamblada sobre los cojinetes, centrando estos bajo el carro.

Se debe verificar que el pistón de empuje del motor tiene un recorrido de 12mm en el sentido de avance.

Situar el medidor de desplazamiento en posición, fijándolo y poniéndolo a cero. Comprobar que dicho medidor de desplazamiento tiene recorrido suficiente. Poner a cero el medidor de fuerzas.

Comprobar que el pistón de carga vertical está perfectamente, y medir la altura, h_4 , desde la parte superior del pistón de carga hasta la caja de corte, con una precisión de 0.1mm.

Acto seguido, se ensambla el yugo de aplicación de la fuerza vertical, haciéndole descansar sobre el asiento central en forma de casquete esférico del pistón de carga. Se debe comprobar que en esta operación no se ha desplazado dicho pistón, centrándole si fuese necesario.

Se mide la altura, h_5 , desde el borde superior del pistón de carga hasta la superficie de la caja de corte, con una precisión de 0.1mm. La diferencia $h_4 - h_5$ es el asiento producido en la probeta, debida al yugo.

Se fija el medidor de deformaciones verticales debidamente centrado, comprobando que tiene suficiente recorrido en los dos sentidos. Se pone a cero o se anota la lectura inicial.

Ajustes antes de la rotura. Antes de la rotura de la probeta se debe elegir la velocidad de desplazamiento horizontal. En suelos arenosos en los que la consolidación ocurre casi instantáneamente, la velocidad de desplazamiento se elige de tal manera que la rotura dure entre 5 y 10 min.

Tipo de suelo	Desplazamiento de la caja para alcanzar la máxima resistencia
Arena floja	5 a 8
Arena compacta	2 a 5
Arcilla plástica	8
Arcilla dura	2 a 5
Arcilla muy dura	1 a 2

Figura 2.4. Relación tipo de suelo- desplazamiento de la caja (mm) UNE 103401

Se debe comprobar que todas las componentes horizontales estén en contacto, pero sin carga horizontal.

Se retiran los dos tornillos pasadores que fijan las dos mitades de la caja de corte. Acto seguido se introducen los dos tornillos separadores girándolos hasta que hagan contacto con la mitad inferior de la caja de corte. Se giran simultáneamente ambos tornillos media vuelta para que se produzca la separación de las dos mitades de dicha caja.

A continuación, se giran unas vueltas, en sentido contrario al anterior, para separarlos de las mitades inferiores de la caja de corte. Con estas operaciones se pretende evitar el contacto de ambas mitades en el ensayo y la inclusión de suelo entre ellas. En suelos cohesivos, media vuelta es suficiente; en suelos arenosos, algo más, pero sin sobrepasar un milímetro.

Se anotan las lecturas iniciales de los medidores de desplazamiento y del de fuerzas.

Rotura de la probeta. Se ponen en marcha el motor con la velocidad seleccionada y el cronómetro. Se toman lecturas del tiempo transcurrido, de la deformación vertical, de la deformación horizontal y de la fuerza horizontal, a intervalos regulares del desplazamiento horizontal, que permitan al menos 25 lecturas en el ensayo. Una lectura cada 0,1 mm de desplazamiento horizontal puede ser apropiada para la mayoría de los suelos. Si interesa fijar la resistencia máxima, las lecturas se deben tomar por intervalos apropiados de la fuerza horizontal.

Se continúa el ensayo hasta que se sobrepase en varias lecturas la fuerza máxima o hasta el máximo recorrido que permita el aparato si no hay un pico definido. Después, se para el motor.

Actuando manualmente o con el motor se llevan ambas mitades de la caja de corte a su posición inicial.

Si el ensayo se realiza con probeta inundada de agua, se extra esta y se deja que drenen unos 10 min.

Se retiran las pesas del colgadero y el yugo de fuerzas verticales.

Se desmonta la caja de corte y se recoge todo el suelo de la probeta en una bandeja.

Se determina la masa húmeda final de la probeta, m_{hf} , con una precisión de 0.01g. se deseca en la estufa a una temperatura inferior a 60°C hasta masa constante y se determina la masa seca final de la probeta m_{df} , con una precisión de 0.01g y la humedad final, w_f , en %.

6) Obtención y expresión de los resultados

Humedad inicial, expresada en %.

$$w_i = \frac{m_{hi} - m_{di}}{m_{di}} \times 100$$

m_{hi} masa inicial húmeda.

m_{di} masa inicial seca.

Densidad aparente, expresada en g/cm^3 .

$$\rho = \frac{m_{hi}}{A \times h} \times 1000$$

A es el área inicial de la probeta en mm^2 .

h es la altura inicial de la probeta, mm.

Densidad seca inicial, expresada en g/cm^3 .

$$\rho_d = \frac{m_{di}}{A \times h} \times 1000$$

Índice de huecos inicial, adimensional.

$$e_i = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

ρ_s es la densidad de las partículas, en cm^3 .

Grado de saturación inicial, expresado en %.

$$S_i = \frac{w_i \times \rho_s}{e_i}$$

Índice de huecos final.

$$e = e_i - \frac{\Delta h}{h} (1 + e_i)$$

Tensión de corte.

$$\tau = \frac{F_h}{A} \times 1000$$

Nota: para nuestros cálculos tenemos que corregir el área.

Caja de corte cuadrada:

El área corregida en cualquier instante durante el ensayo, A_c , expresada en mm^2 ,

es:

$$A_c = L_1 \times (L_2 - \Delta l)$$

Donde:

L_1 es la longitud del lado perpendicular a la dirección de corte, expresada en mm.

L_2 es la longitud inicial del lado en la dirección de corte, expresada en mm.

Δl es el desplazamiento relativo entre las dos mitades de la caja de corte en cualquier instante durante el ensayo, expresada en mm.

3 Aparatos de laboratorio para ejecución de ensayos y preparación de muestras

3.1 El aparato 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 (Imagen 3.1).
- Cuadro de maniobra formado por un pulsador de marcha, otro de paro y dos pulsadores para elegir el sentido de la marcha (Imagen 3.1).



Imagen 3.1 Cuadro de maniobra 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 (Imagen 3.2).
- Dos transductores de deformación de 25mm y 10mm, que sustituyen a los comparadores de consolidación y de deformación (Imagen 3.3).



Imagen 3.2 transductor vertical

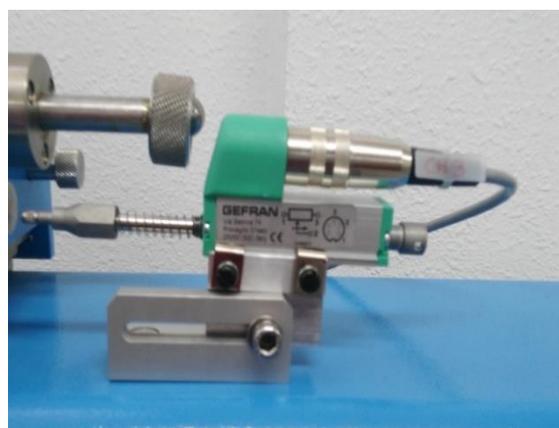


Imagen 3.3 transductor horizontal

- 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 3.4 Aparato de corte directo

3.2 Módulo de adquisición de datos Cyber-plus y software Shearlab

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:

- 1) Teclado (Imagen 3.5).
- 2) Pantalla táctil (Imagen 3.5).
- 3) Puerto tarjeta SD (lateral aparato).
- 4) Puerto USB (lateral aparato).
- 5) Entrada web (Imagen 3.6).
- 6) 8 entradas para canales (Imagen 3.6).
- 7) Entrada de monitores (Imagen 3.6).
- 8) Entrada de corriente (Imagen 3.6).
- 9) Interruptor de encendido (Imagen 3.6).



Imagen 3.5. Cyber-plus

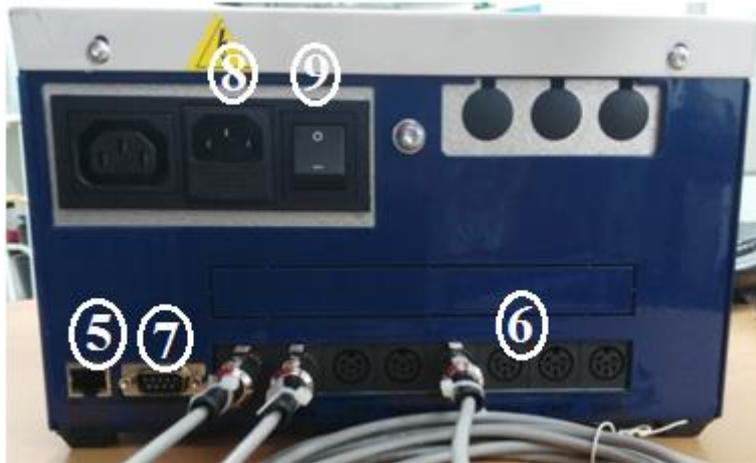


Imagen 3.6. Cyber-Plus parte trasera

El aparato no tiene memoria interna por lo que se necesita en todo momento tener conectado un dispositivo de almacenamiento externo. Una vez encendido cuenta con un menú para poder utilizar el aparato. Este menú está dividido en los siguientes submenús:

- Registro de datos (Imagen 3.7), aparecen las medidas que se están realizando en el momento actual.
- Visualización de las alarmas activadas (Imagen 3.7), muestra en las pantallas si se produce algún error.
- Archivo de ensayo (Imagen 3.7), aparecen los ensayos que hay guardados en la memoria externa.
- Configuración sistema (Imagen 3.8).
- Panel de control (Imagen 3.8), pulsando nos aparece otro submenú:
 - Fecha y hora.
 - Configuración internacional.
 - Calibración pantalla táctil.
 - Ahorro de energía (Imagen 3.9).
 - Conexión de red (Imagen 3.9).
 - Programa (Imagen 3.10).



Imagen 3.7 Menú principal



Imagen 3.8 Panel de control



Imagen 3.9 Submenú



Imagen 3.10 Submenú

Software Shearlab

Una vez obtenidos los datos que Cyber-Plus evolution nos ha dado, pasamos a introducirlos en Shearlab reports. Para ello tenemos que seguir una serie de indicaciones:

- 1) Los datos que nos llega de Cyber-Plus evolution están ordenados en columnas en el siguiente orden: Tiempo, carga, desplazamiento vertical y desplazamiento horizontal. Shearlab está configurado para recibir la información de la siguiente manera: Tiempo, desplazamiento vertical, desplazamiento horizontal y carga. Por lo que debemos cambiar el orden de las columnas.
- 2) Cyber-Plus evolution da los separadores decimales con un punto, pero Shearlab reports solo acepta comas como separador por lo que antes de introducir los datos en el programa también tenemos que cambiarlos, esto lo hacemos en el archivo .txt con la función reemplazar (Imagen 3.11).

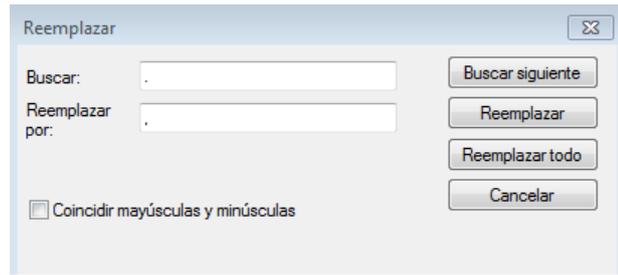


Imagen 3.11 Reemplazar puntos por comas

- 3) Para nuestro ensayo de corte directo hemos usado una caja cuadrada de 60 x 60 mm, por lo que necesitamos un área equivalente para calcular la fuerza, ya que el área en el ensayo va disminuyendo conforme este avanza. Para este cálculo nos fijamos en lo que dice la norma UNE 103401.
- 4) Una vez hechas todas las correcciones ya podemos introducir nuestros datos en Shearlab reports, para ello abriremos el programa usando la función “ejecutar como administrador”. Al hacer esto nos aparecerá el menú de Shearlab reports (Imagen 3.12).



Imagen 3.12 Menú Shearlab reports

- 5) Para introducir los datos tenemos que seleccionar “Manual input”, al seleccionarlo nos llevara el siguiente menú (Imagen 3.13).

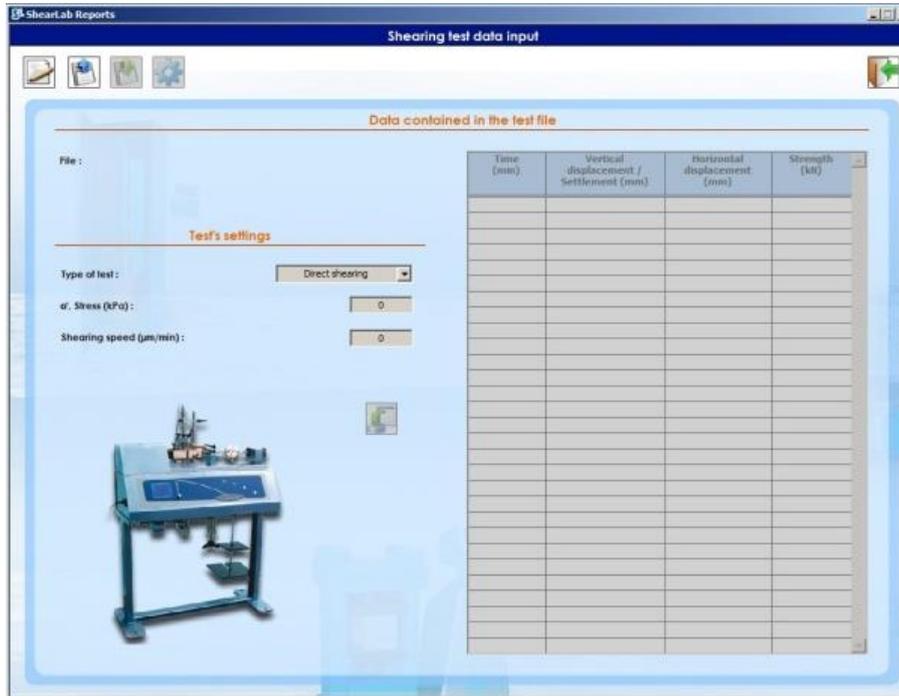


Imagen 3.13

- 6) Después creamos un área de trabajo, para ello seleccionaremos “New test file” (Imagen 3.14). Una vez creada nos aparecerá un menú para rellenar las características del ensayo con nuestros datos (Imagen 3.15).

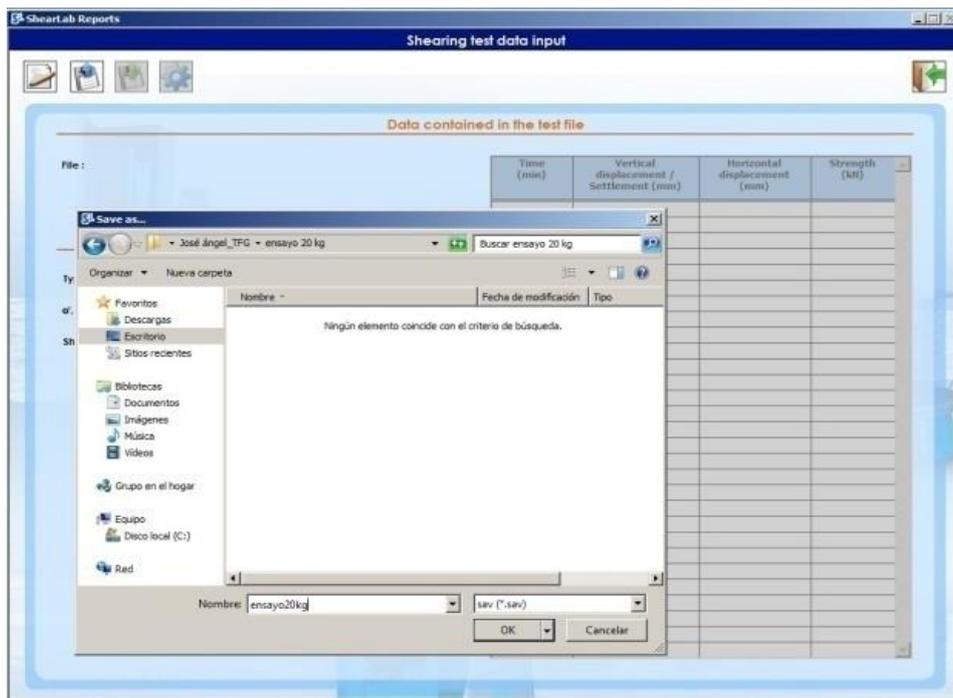


Imagen 3.14

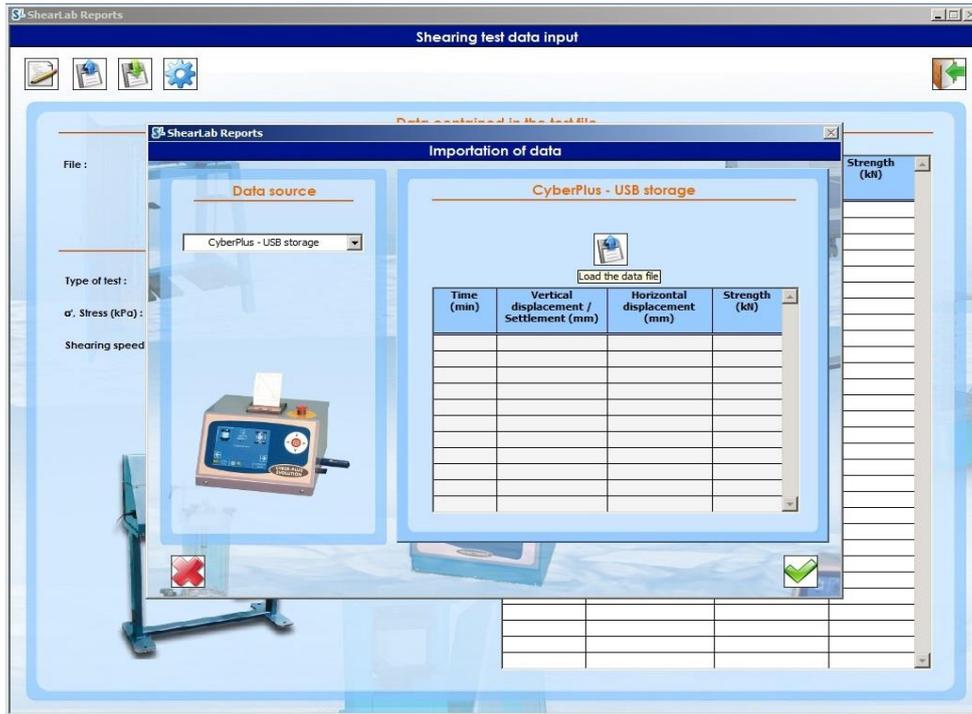


Imagen 3.17

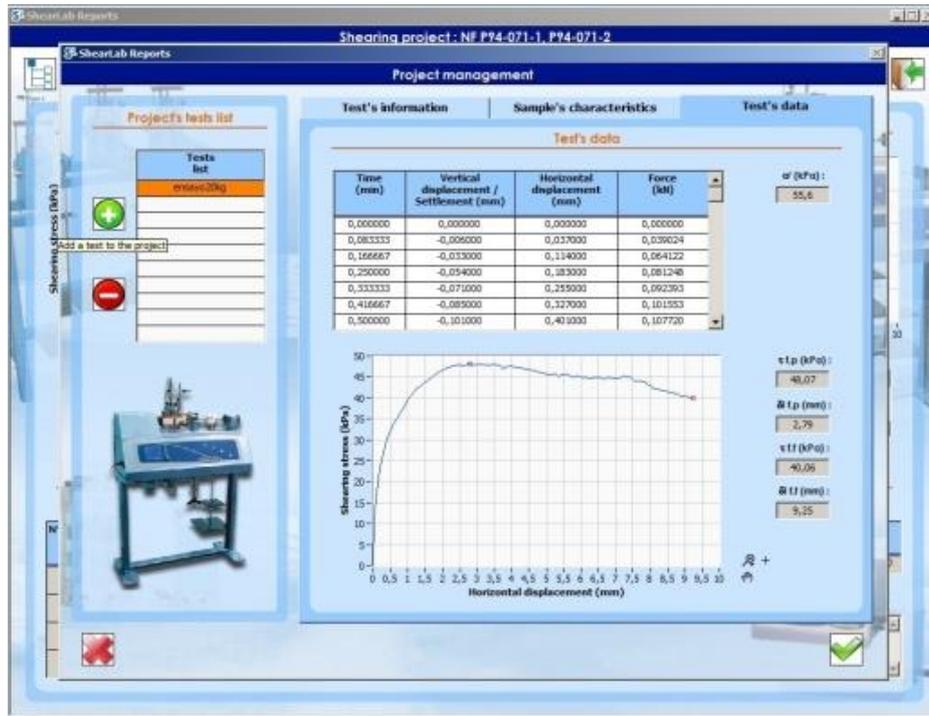


Imagen 3.18

8) Una vez seguidos todos estos pasos nos aparecerá una ventana final (Imagen 3.19) con todos nuestros datos del ensayo representados, en esta ventana y a través de los iconos que aparecen en la parte superior izquierda podemos:

- Obtener información sobre el proyecto que hemos hecho.
- Añadir nuevos ensayos.
- Crear un nuevo proyecto.
- Imprimir el proyecto actual y pasar los datos a un pdf.

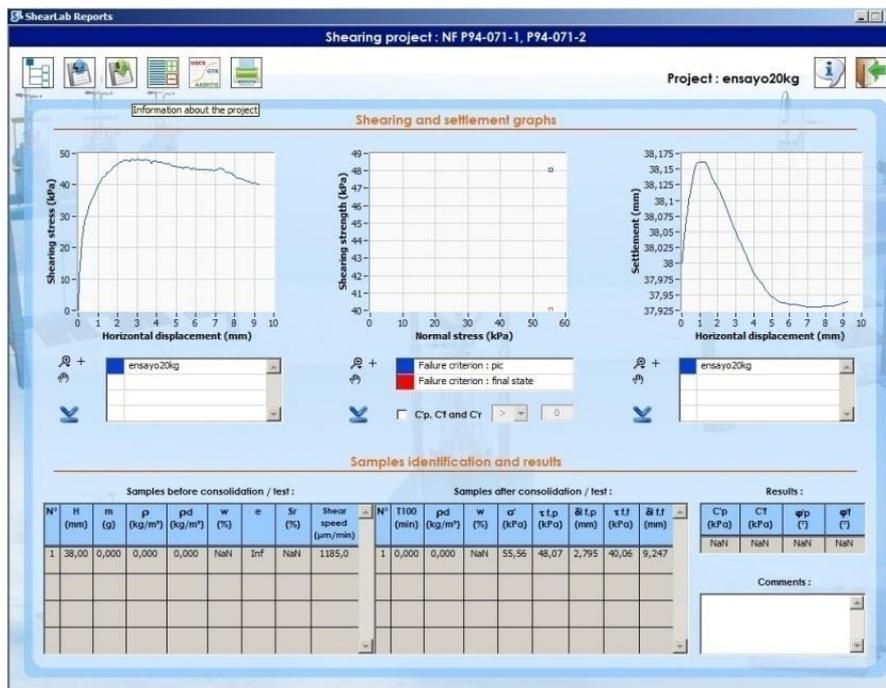


Imagen 3.19

9) Como resumen y para que el programa funcione hemos tenido que obtener los siguientes archivos (Imagen 3.20).

Nombre ^	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
ensayo20kg.prj	24/01/2017 11:34	Archivo PRJ	7 KB
ensayo20kg.sav	24/01/2017 11:30	Archivo SAV	7 KB
ENSAYO20KGBUENO 23-01-2017 20.07.05	23/01/2017 20:29	Documento de texto	8 KB
ENSAYO20KGBUENO(corregido1) 23-01-201...	24/01/2017 11:29	Documento de texto	8 KB

Imagen 3.20

3.3 Material para preparación de muestras y otros ensayos

Para comenzar a preparar la muestra, hace falta realizar el montaje de la caja de corte, la cual consta de las siguientes piezas:

- La propia caja de corte, la cual está dividida en una mitad superior y otra mitad inferior, unidas por dos tornillos (Imagen 3.21).
- Una placa base acanalada (Imagen 3.21).
- Dos placas ranuradas (Imagen 3.21).
- Un pistón de carga (Imagen 3.21).

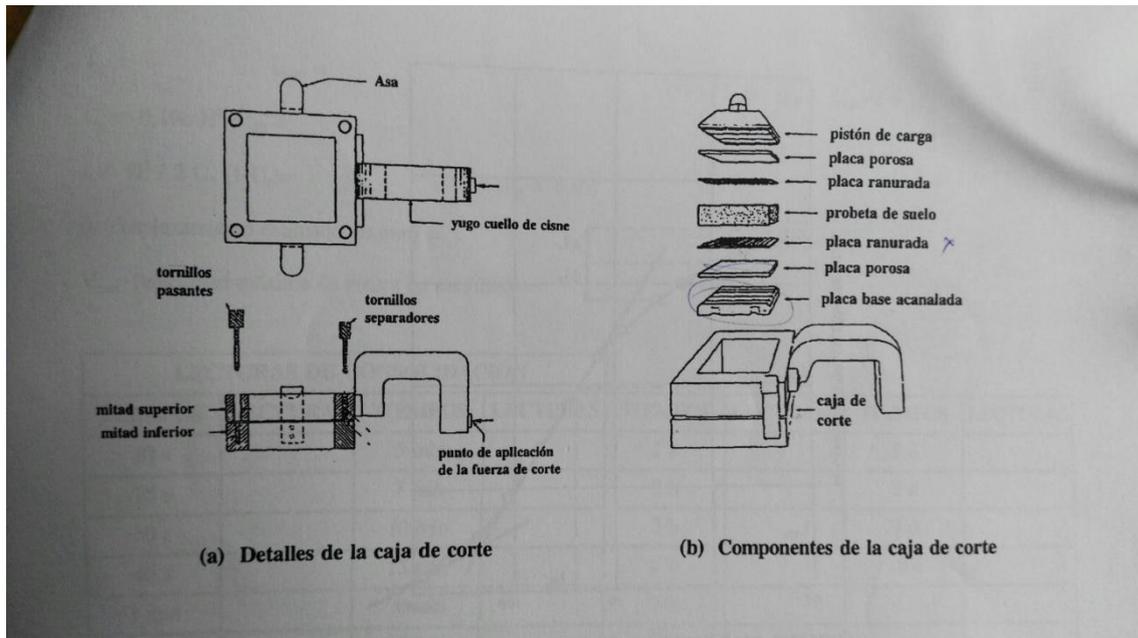


Imagen 3.21. Componentes de la caja de corte

Cuando tenemos la caja de corte ya montada, nos disponemos a introducir la arena, la cual dependiendo de las condiciones a la que queremos que se encuentre, la introduciremos de una forma u otra.

Si queremos que la arena esté suelta, nos ayudamos de un embudo (Imagen 3.22) introduciéndola a poca altura para evitar que se compacte.

En cambio, si deseamos que la arena esté compacta nos ayudamos de una maza (Imagen 3.22) y golpeando con cierta intensidad le provocamos vibraciones a la caja, lo que provoca que la arena se vaya compactando poco a poco.

Cuando humidecemos la arena, necesitamos unos recipientes (Imagen 3.22) para poder meterlos al horno y poder calcular la humedad a la que se encuentra la muestra.



Imagen 3.22. Utensilios de apoyo para la preparación de la muestra.

4 Pruebas de laboratorio

4.1 Selección de muestras

La muestra con la que hemos estado trabajando y analizando es una arena seca obtenida de La Manga – Mar Menor. Según la curva granulométrica (Gráfica 4.1, UNE 103101), la cual veremos en el apartado 4.2, se trata de una arena fina-media.

4.2 Medidas iniciales y programación de la velocidad de rotura

Para comenzar, previo a los ensayos, realizamos un análisis granulométrico por tamizado, según la norma “UNE-103100”.

Abertura	Peso parcial	% Retenido	% Retenid _{acum}	% Pasante _{acum}
2	0,37 g	0,06	0,06	99,94
0,63	3,75 g	0,615	0,675	99,32
0,4	3,32 g	0,544	1,22	98,78
0,3	14,81 g	2,43	3,65	96,25
0,2	429,38 g	70,43	74,07	25,93
0,15	129,5 g	21,24	95,31	4,69
0,075	26,3 g	4,31	99,6	0,4
< 0,075	3,07 g	0,504	100	0

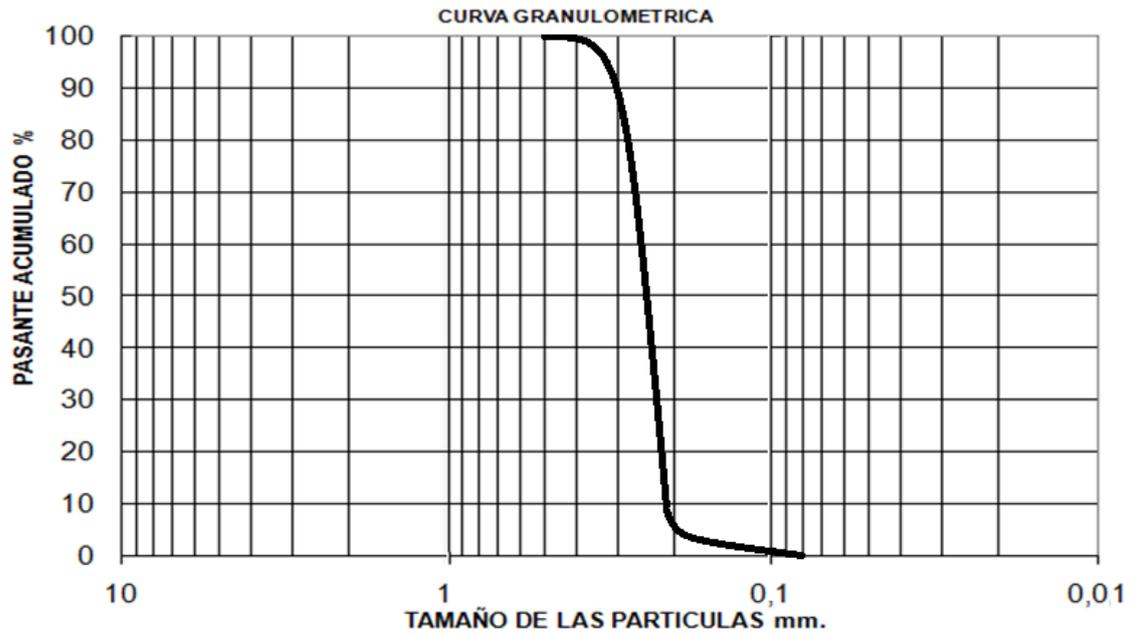
Tabla 4.1. Datos del análisis granulométrico

Donde:

Masa de recipiente + muestra	0,863 kg
Masa de recipiente	0,252 kg
Masa de muestra	0,611 kg
Masa de muestra tras tamizado	609,64 g
Porcentaje de error (<5%)	0,22 %

Tabla 4.2. Resultados de las Masas

Según la curva granulométrica se trata de una arena fina-media. La preparación de la muestra de arena seca para el ensayo de corte, de acuerdo con la Norma 103401, es la siguiente:



Gráfica 4.1 Curva granulométrica

Otro cálculo previo que nos disponemos a realizar antes de comenzar con los ensayos de arena es el cálculo de la densidad relativa de las partículas del suelo “ G_s ”, en el cual nos apoyaremos en la norma “UNE-103-302-94”.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Masa de picnómetro + agua	169,9 g	171,07 g	152,93 g
Masa de sólidos (M_s)	171,07 g	4,43 g	5,3 g
Masa de picnómetro + agua + sólidos	173,35 g	173,85 g	156,32 g
Masa de agua (M_w)	1,96 g	1,65 g	1,91 g
$G_s = \frac{M_s}{M_w}$	2,76	2,68	2,77
G_s final	2,736		

Tabla 4.3. Ensayos para el cálculo del G_s

En las siguientes imágenes podemos observar el procedimiento llevado a cabo en dichos ensayos.



Imagen 4.1. Masa del Picnómetro + Masa de Agua

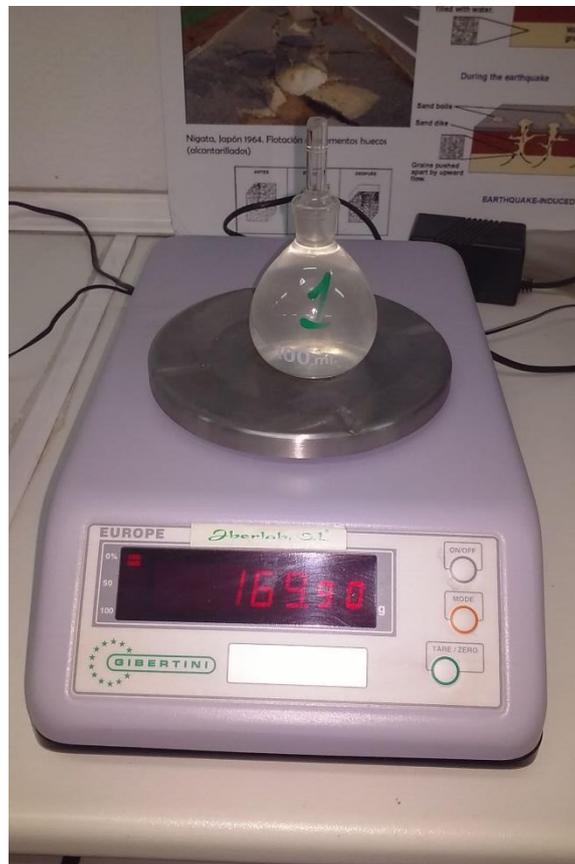


Imagen 4.2. Masa del Picnómetro + Masa de Agua. Ensayo 1



Imagen 4.3. Introduciendo Masa de sólidos en el picnómetro

Para los ensayos hemos optado por usar una máxima velocidad de desplazamiento horizontal de 0.875 mm/min. Según la norma, en suelos arenosos, en los que la consolidación ocurre casi instantáneamente, la velocidad de desplazamiento se elige de tal manera que la rotura dure entre 5 min y 10 min. Para una arena floja el desplazamiento de la caja para alcanzar la máxima resistencia debe estar en un rango de valores comprendido entre 5 mm y 8 mm, por lo que:

$$V_{max} = \frac{d_f}{t_f} = \frac{7 \text{ mm}}{8 \text{ min}} = 0,875 \text{ mm/min}$$

4.3. Metodología de ejecución de los ensayos

Para la realización de los ensayos en el aparato de corte directo previamente hemos tenido que preparar la muestra, cada ensayo tiene una preparación distinta, la cual veremos más adelante cuando describamos cada procedimiento en detalle. Una vez tenemos nuestra muestra deberemos seguir los siguientes pasos:

1. Colocamos la célula en el carro deslizante, 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.
2. Ajustamos la muestra en el carro deslizante, 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 4.4. Máquina corte directo

3. Colocamos el peso deseado para la realización del ensayo, para ello colocaremos las pesas en el soporte (Imagen 4.5). 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 4.5. Soporte para colocar el peso

- 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.

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.

- Encendemos Cyber-Plus evolution y una vez que estamos en el menú principal seleccionamos “Registro de datos” (Imagen 4.6), al seleccionarlo nos aparecerá una pantalla con unos valores (Imagen 4.7), estos valores son las mediciones que proporcionan los transductores.



Imagen 4.6



Imagen 4.7

6. Pulsando en el icono  entraremos en el submenú para programar el registro de datos (Imagen 4.8). En este submenú pondremos la descripción de nuestro ensayo, el dispositivo de almacenamiento Si pulsamos  aparecerá la siguiente pantalla (Imagen 4.9).



Imagen 4.8

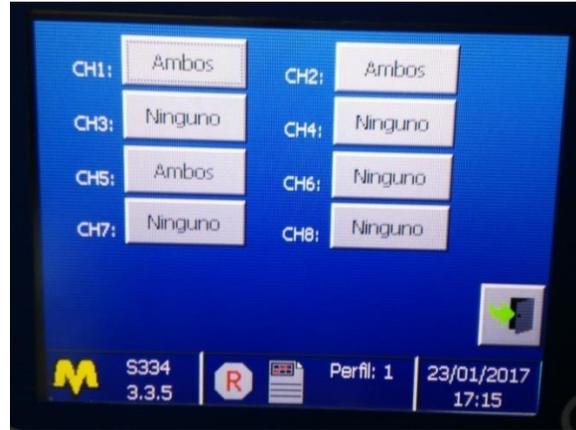


Imagen 4.9

7. En esta imagen tenemos que elegir entre varias opciones para nuestros canales (Imagen 4.10):
- 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.

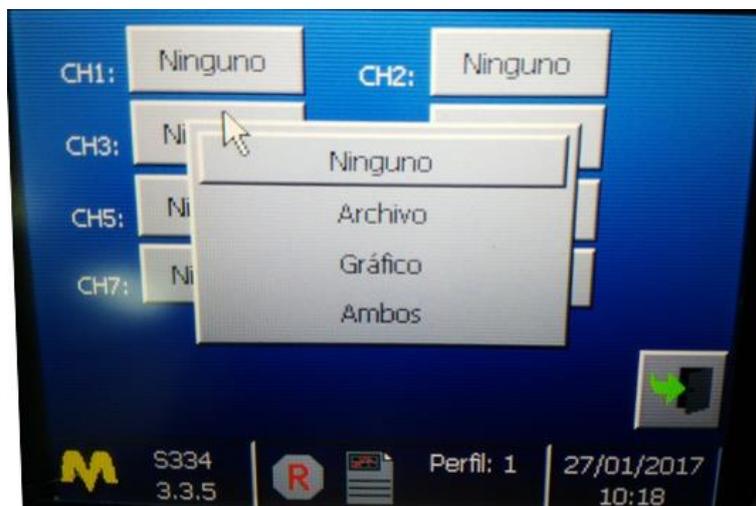


Imagen 4.10

8. Hecho esto y volviendo a la pantalla anterior (Imagen 6.10), pulsando , entraremos en otro submenú (Imagen 4.11) 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 4.11

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

10. Comenzado el ensayo y pulsando , nos aparecerá la gráfica de los datos que los transductores y el dinamómetro están recogiendo (Imagen 4.12), para poder desplazarnos entre las diferentes graficas pulsaremos. .



Imagen 4.12

11. Con el ensayo ya terminado pasamos los datos a Shearlab y obtenemos un archivo que recoge toda la información del ensayo realizado.

A continuación, vamos a mostrar el proceso de preparación de las muestras de cada ensayo y los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

4.4. Ensayos

4.4.1. Arena suelta seca

Lo primero que hacemos es desmenuzar la muestra y desecarla en una estufa a menos de 60°C hasta masa constante, tenemos que retirar cualquier partícula que supere el 1/10 de la altura de la probeta. Dejamos desecar la muestra y determinamos su masa con una precisión de 0.01g.

Comenzamos montando la caja de corte con la placa base acanalada (Imagen 4.13). Seguidamente colocamos encima de la placa acanalada una placa ranurada (Imagen 4.14). Es importante que la dirección de las ranuras sea perpendicular a la dirección de corte.



Imagen 4.13 Montaje caja

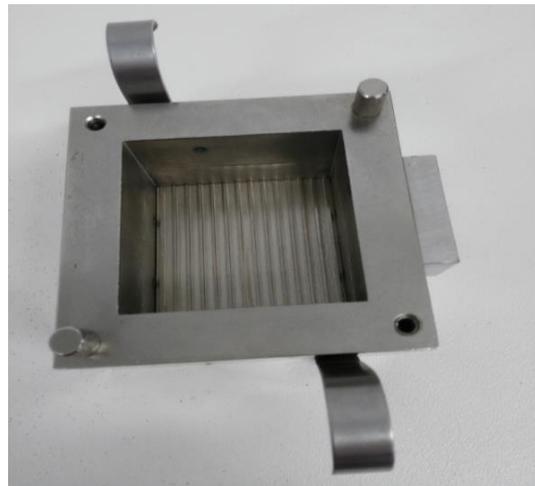


Imagen 4.14 Placa ranurada

Rellenamos con nuestra arena hasta llenarla (Imagen 4.15). Es importante que la arena caiga desde una altura pequeña, sino esta se compactaría con la caída, para esto nos ayudamos de un embudo. Posteriormente, enrasamos la superficie de la caja de corte, retirando el material que sobra, para esto nos ayudaremos de una espátula para enrasar (Imagen 4.16).

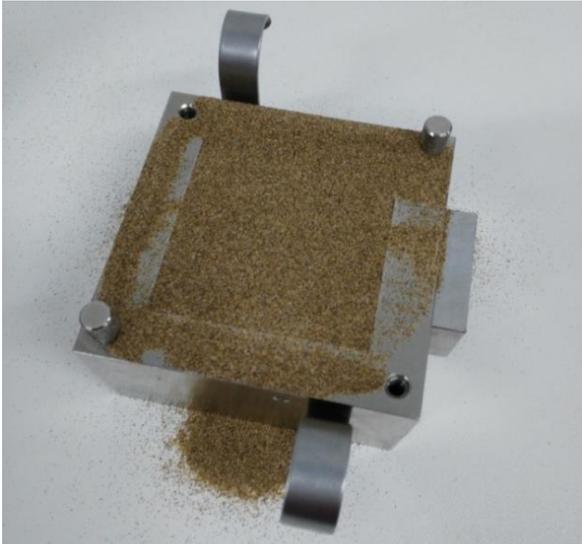


Imagen 4.15 Arena en la caja



Imagen 4.16 Arena nivelada

Por último, colocamos la placa ranurada, similar a la de la imagen 4.14. Las ranuras tienen que estar en contacto con la arena (Imagen 4.17).

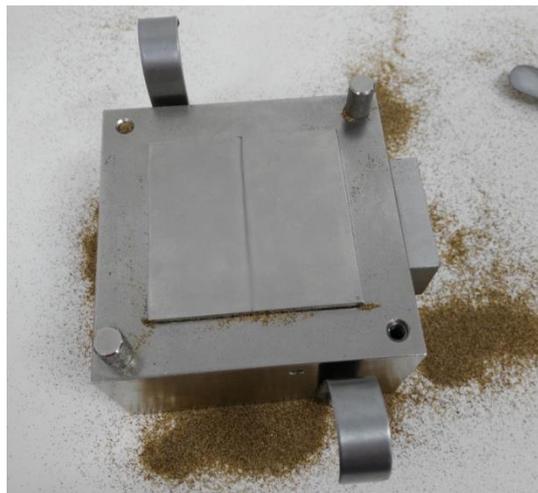


Imagen 4.17 Placa ranurada superior

Ya disponemos de nuestra muestra para poder introducirla en la máquina de corte directo y comenzar con nuestro ensayo.

El Peso de la caja (Célula + placa base + 2 placas ranuradas + 2 tornillos) es de 2,33 Kg.

	Ensayo 1 kg	Ensayo 2 kg	Ensayo 4 kg	Ensayo 8 kg
Peso Caja + Arena	2,568 kg	2,569 kg	2,567 kg	2,576 kg
Asentamiento elástico Inmediato	0,374 mm	0,618 mm	1,19 mm	2,413 mm

Tabla 4.2 Datos de peso y asentamiento del ensayo de arena suelta seca

Parámetros	Resultados
Densidad aparente (ρ)	1.7 g/cm ³
Densidad seca inicial (ρ_d)	1.7 g/cm ³
Humedad inicial (w_i)	0%
Índice de huecos inicial (e_1)	0.61 adimensional

Tabla 4.3 Datos propiedades muestra del ensayo 2 kg

Los resultados obtenidos del programa Shearlab para arena suelta seca se muestran en la Imagen 4.18.

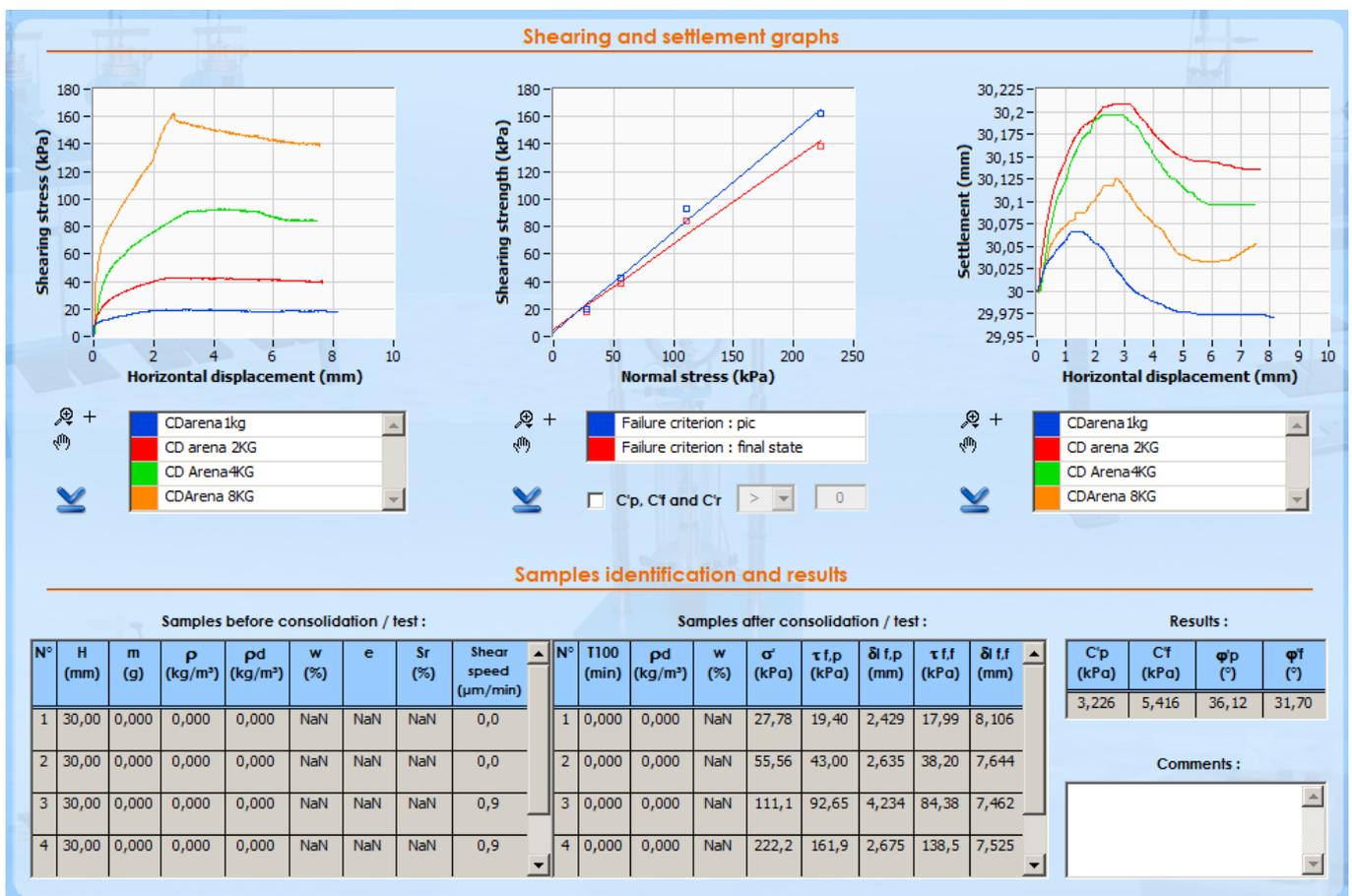


Imagen 4.18 Resultados del ensayo de arena suelta seca

4.4.2. Arena suelta saturada

El proceso de montaje de la caja de corte y la manera de introducir la arena es similar a los ensayos de arena suelta seca. Pero al colocar dicha caja en el carro deslizante de la máquina, se llena de agua hasta un nivel que coincida aproximadamente con el de la altura final de la probeta de suelo.

En la siguiente imagen se podría observar como el cuenco de la máquina de corte directo está lleno de agua.

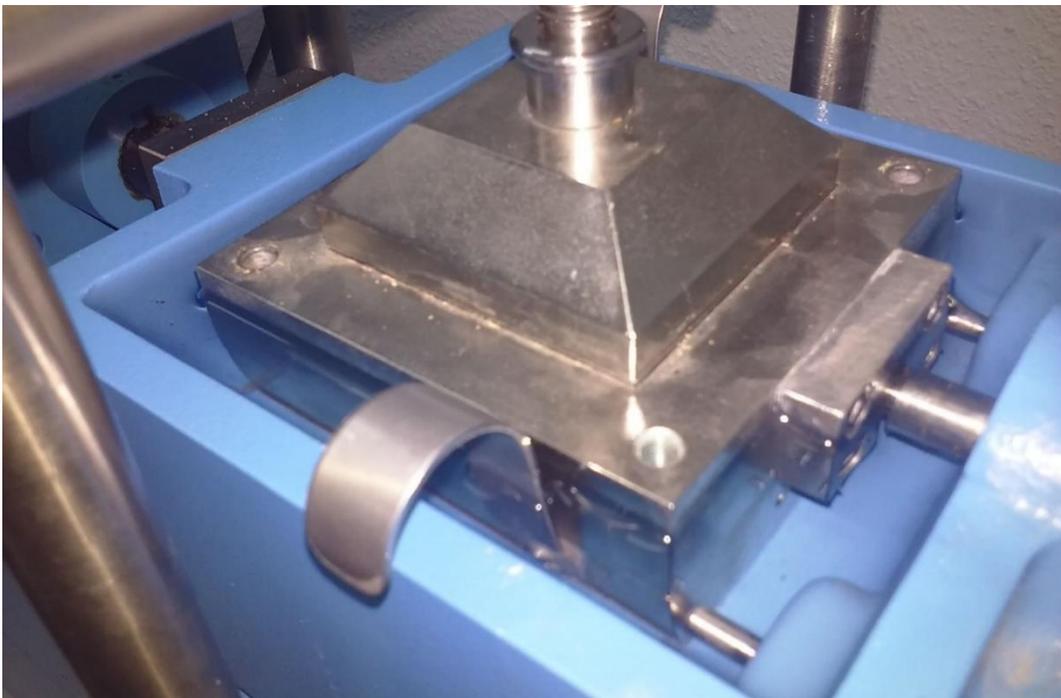


Imagen 4.19 Cuenco lleno de agua

	Ensayo 1 kg	Ensayo 2 kg	Ensayo 4 kg	Ensayo 8 kg
Peso Caja + Arena	2,571 kg	2,572 kg	2,567 kg	2,574 kg
Asentamiento elástico Inmediato	1,102 mm	0,789 mm	1,398 mm	0,952 mm

Tabla 4.4 Datos de peso y asentamiento del ensayo de arena suelta saturada

Parámetros	Resultados
Densidad aparente (ρ)	1.723 g/cm ³
Densidad seca inicial (ρ_d)	1.723 g/cm ³
Humedad inicial (w_i)	0%
Índice de huecos inicial (e_1)	0.59 adimensional

Tabla 4.5 Datos propiedades muestra del ensayo 2 kg

Los resultados obtenidos del programa Shearlab para arena suelta saturada se muestran en la Imagen 4.20.

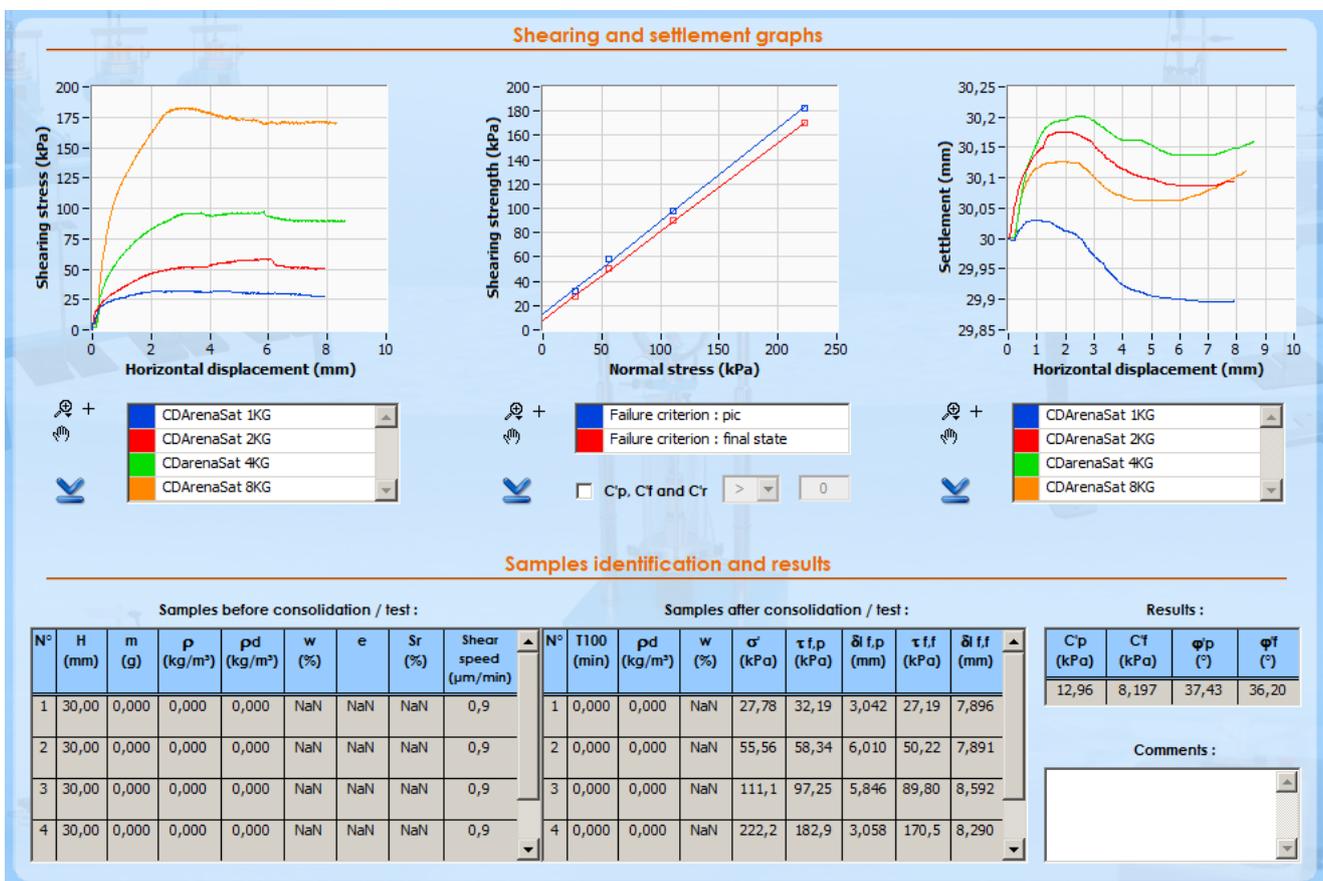


Imagen 4.20 Resultados del ensayo de arena suelta saturada

4.4.3. Arena compacta seca

Para comenzar este ensayo, primero montamos la caja de corte con la placa base acanalada y la placa ranurada sin orificios, con las ranuras hacia arriba y el sentido de éstas perpendicular a la dirección de corte.

En este proceso necesitamos que la arena esté compactada por lo que vertimos un poco dentro de la caja de corte, agitamos la caja con cierta intensidad durante un tiempo y seguidamente la golpeamos para provocarle una vibración y así conseguir la compactación deseada.

Repetimos este proceso varias veces hasta conseguir que la caja esté llena con arena compactada y enrasamos la superficie de la arena, retirando el material que sea necesario.

Acabamos colocando la placa ranurada sin orificios, con las ranuras hacia abajo y la correcta dirección perpendicular a la de corte, procurando dentro de lo posible que la dicha placa quede horizontal.

	Ensayo 1 kg	Ensayo 2 kg	Ensayo 4 kg	Ensayo 8 kg
Peso Caja + Arena	2,6 kg	2,595 kg	2,598 kg	2,602 kg
Asentamiento elástico Inmediato	0,201 mm	0,311 mm	1,229 mm	0,507 mm

Tabla 4.6 Datos de peso y asentamiento del ensayo de arena compacta seca

Parámetros	Resultados
Densidad aparente (ρ)	1.91 g/cm ³
Densidad seca inicial (ρ_d)	1.91 g/cm ³
Humedad inicial (w_i)	0%
Índice de huecos inicial (e_1)	0.43 adimensional

Tabla 4.7. Datos propiedades muestra del ensayo 4 kg

Los resultados obtenidos del programa Shearlab para arena compacta seca se muestran en la Imagen 4.21.

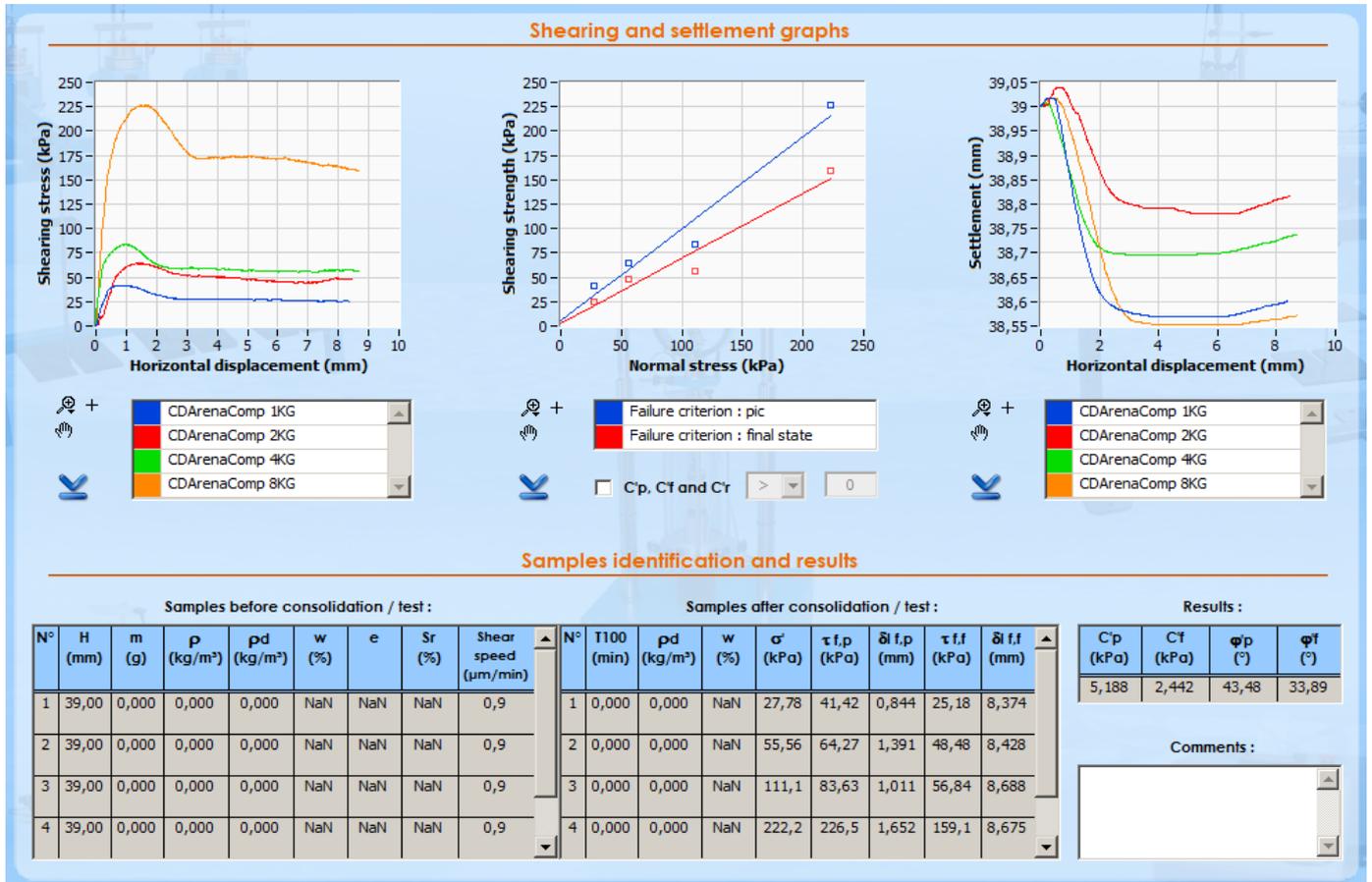


Imagen 4.21 Resultados del ensayo de arena compacta seca

4.4.4. Arena compacta húmeda

En este caso debemos añadir agua a la arena para conseguir la humedad deseada, se mezcla perfectamente para homogeneizar la humedad. Antes de comenzar el ensayo debemos tomar una pequeña cantidad para verificar la humedad.

Montamos la caja de corte con la placa base acanalada y la placa ranurada sin orificios, con las ranuras hacia arriba y el sentido de éstas perpendicular a la dirección de corte. Se procede a la compactación siguiendo el método ya descrito para la arena seca compactada.

Acabamos colocando la placa ranurada con orificios, con las ranuras hacia abajo y la correcta dirección perpendicular a la de corte, procurando dentro de lo posible que la dicha placa quede horizontal.

	Ensayo 1 kg	Ensayo 2 kg	Ensayo 4 kg	Ensayo 8 kg
Peso Caja + Arena	2,623 kg	2,615 kg	2,615 kg	2,623 kg
Asentamiento elástico Inmediato	0,298 mm	0,531 mm	1,766 mm	0,6 mm

Tabla 4.8. Datos de peso y asentamiento del ensayo de arena compacta húmeda.

	Ensayo 1 kg	Ensayo 2 kg	Ensayo 4 kg	Ensayo 8 kg
Peso recipiente	33,07 g	34,12 g	34,02 g	33,91 g
Recipiente + Agua + Arena	57,43 g	56,9 g	60,54 g	64,53 g
Recipiente + Arena	53,43 g	53,99 g	56,85 g	60,25 g

Tabla 4.9. Datos de peso del recipiente de los 4 ensayos.

Ensayo 1 kg:

$$\text{Peso Arena} = 2,623 - 2,33 = 0,293 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen de la caja} = 6 \text{ cm} * 6 \text{ cm} * 3,9 \text{ cm} = 140,4 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{M}{V} = \frac{293 \text{ g}}{140,4 \text{ cm}^3} = 2,087 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Humedad} = \frac{\text{Masa de Agua}}{\text{Masa de suelo}} * 100 = 19,65\%$$

$$M_w + M_s = 293 \text{ g}; \quad \frac{M_w}{M_s} * 100 = 19,65 \quad M_s = 244,88 \text{ g}$$

$$\text{Densidad seca} = \frac{M_s}{V} = \frac{244,88 \text{ g}}{140,4 \text{ cm}^3} = 1,74 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Índice de huecos} = \frac{G_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2,736}{1,74} - 1 = 0,57$$

Parámetros	Resultados
Densidad aparente (ρ)	2,087 g/cm ³
Densidad seca inicial (ρ_d)	1,74 g/cm ³
Humedad inicial (w_i)	19,65 %
Índice de huecos inicial (e_1)	0.57 adimensional

Tabla 4.10 Datos propiedades muestra del ensayo 1 kg

Los resultados obtenidos del programa Shearlab para arena compacta húmeda se muestran en la Imagen 4.22.

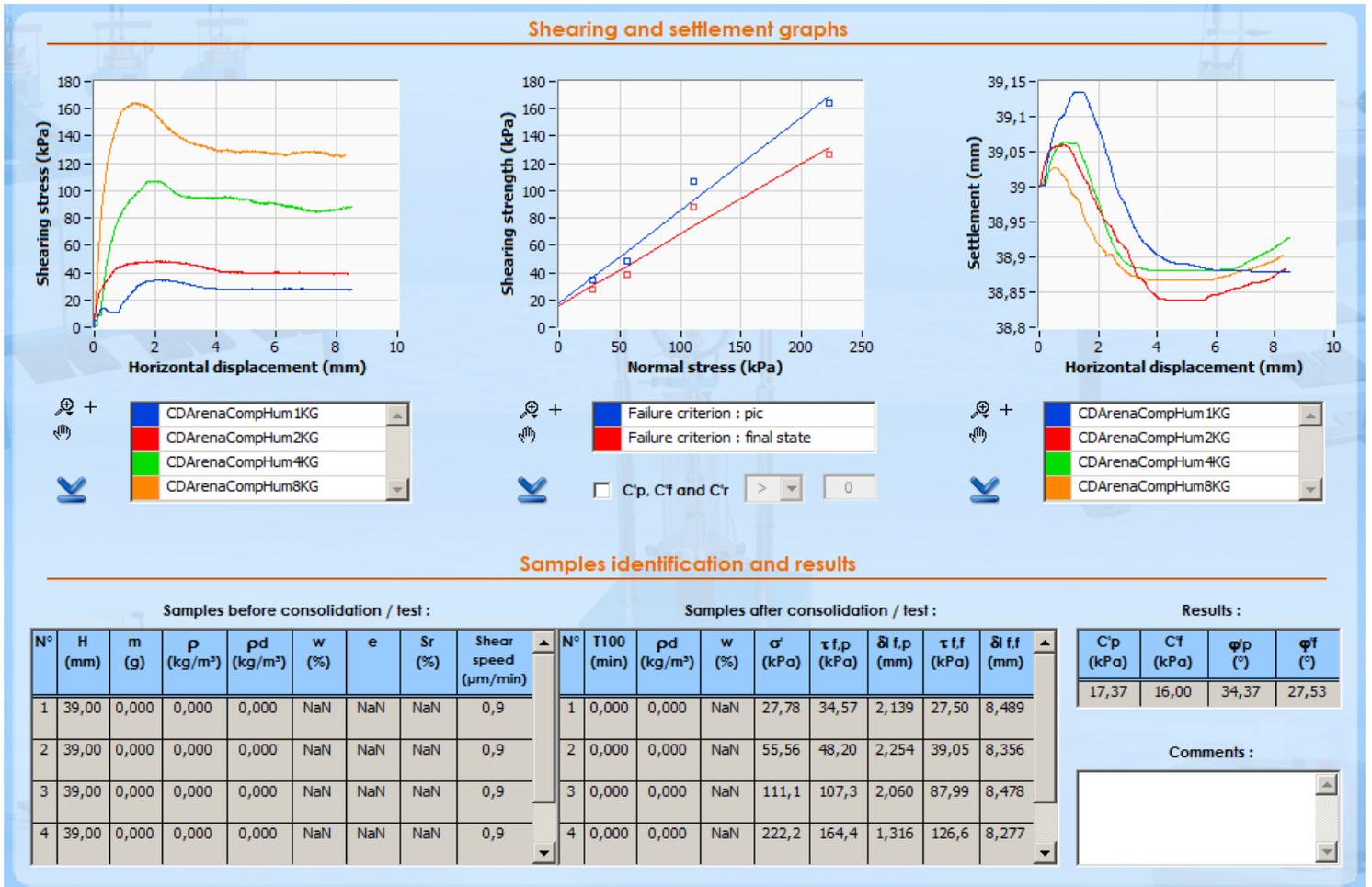


Imagen 4.22 Resultados del ensayo de arena compacta húmeda

4.4.5. Arena compacta saturada

Para el proceso de preparación de la muestra necesitamos que la arena esté compactada por lo que vertimos un poco dentro de la caja de corte, agitamos la caja con cierta intensidad durante un tiempo y seguidamente la golpeamos para provocarle una vibración y así conseguir la compactación deseada.

Repetimos este proceso varias veces hasta conseguir que la caja esté llena con arena compactada y enrasamos la superficie de la arena, retirando el material que sea necesario.

Terminamos colocando la placa ranurada sin orificios, con las ranuras hacia abajo y la correcta dirección perpendicular a la de corte, procurando dentro de lo posible que la dicha placa quede horizontal.

Para conseguir la saturación de la arena, al colocar la caja en el carro deslizante de la máquina, se llena de agua hasta un nivel que coincida aproximadamente con el de la altura final de la probeta de suelo. Similar al proceso ya descrito en el ensayo de arena suelta saturada.

	Ensayo 1 kg	Ensayo 2 kg	Ensayo 4 kg	Ensayo 8 kg
Peso Caja + Arena	2,66 kg	2,654 kg	2,66 kg	2,66 kg
Asentamiento elástico Inmediato	0,136 mm	0,204 mm	0,894 mm	1,817 mm

Tabla 4.11. Datos de peso y asentamiento del ensayo de arena compacta saturada.

Parámetros	Resultados
Densidad aparente (ρ)	2,35 g/cm ³
Densidad seca inicial (ρ_d)	2,35 g/cm ³
Humedad inicial (w_i)	0%
Índice de huecos inicial (e_1)	0.16 adimensional

Tabla 4.12 Datos propiedades muestra del ensayo 4 kg

Los resultados obtenidos del programa Shearlab para arena compacta saturada se muestran en la Imagen 4.23.

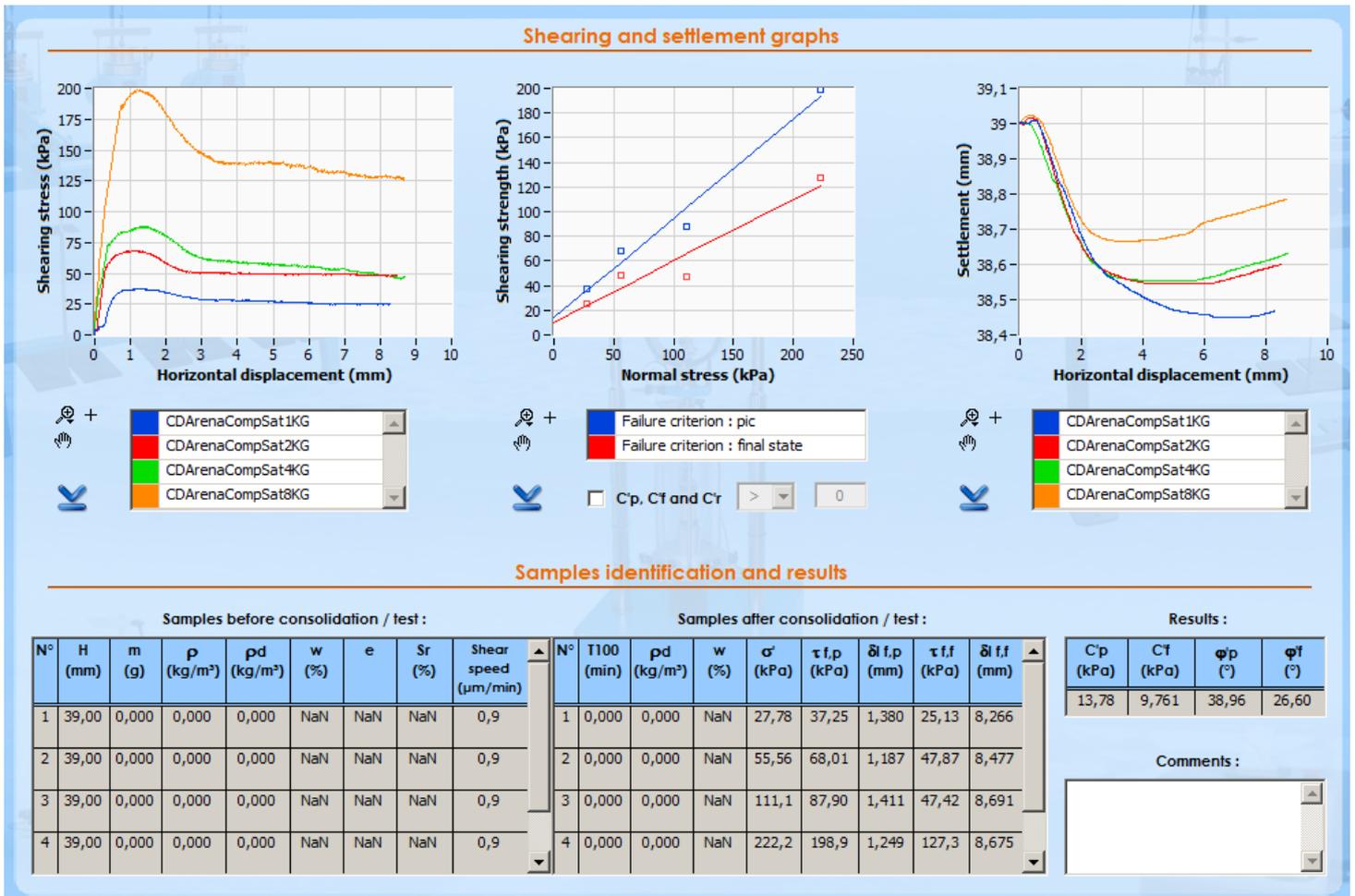


Imagen 4.23 Resultados del ensayo de arena compacta saturada

4.4.6. Arena compacta seca con varias pasadas

El proceso de preparación de la muestra y de compactación de la arena es similar al ensayo de arena compacta seca. Estos ensayos permiten determinar los parámetros de resistencia residual, c_R y ϕ_R , para cualquiera de los tipos de ensayos normales.

En este ensayo, una vez finalizado el proceso normal y parado el motor, se vuelve la caja de corte a su posición inicial. Hemos optado por aplicar en 2 casos 4 pasadas y en los otros 2 casos 8 pasadas, con una duración de unos pocos minutos cada pasada, para establecer un plano de corte. Finalmente hemos dejado en reposo hasta el día siguiente para establecer el equilibrio de presiones.

Se debe verificar que los medidores de deformaciones horizontales y de fuerzas han vuelto a su valor inicial, anotando la lectura del medidor de deformaciones verticales.

Hemos aplicado una velocidad de desplazamiento igual en todos los casos.

Hemos optado por aplicar 8 pasadas, para asegurarnos obtener un valor prácticamente constante de la resistencia al corte.

Ensayo 1 kg: (4 pasadas)

- Peso de casa + arena: 2,602 kg
- Desplazamiento horizontal: 2,861 mm
- Desplazamiento vertical: 7,42mm - 7,064 mm – 6,779 mm – 6,526 mm

Ensayo 4 kg: (4 pasadas)

- Peso de casa + arena: 2,6 kg
- Desplazamiento horizontal: 3,267 mm
- Desplazamiento vertical: 6,961 mm - 7,04 mm – 6,779 mm – 6,526 mm

Ensayo 2 kg: (8 pasadas)

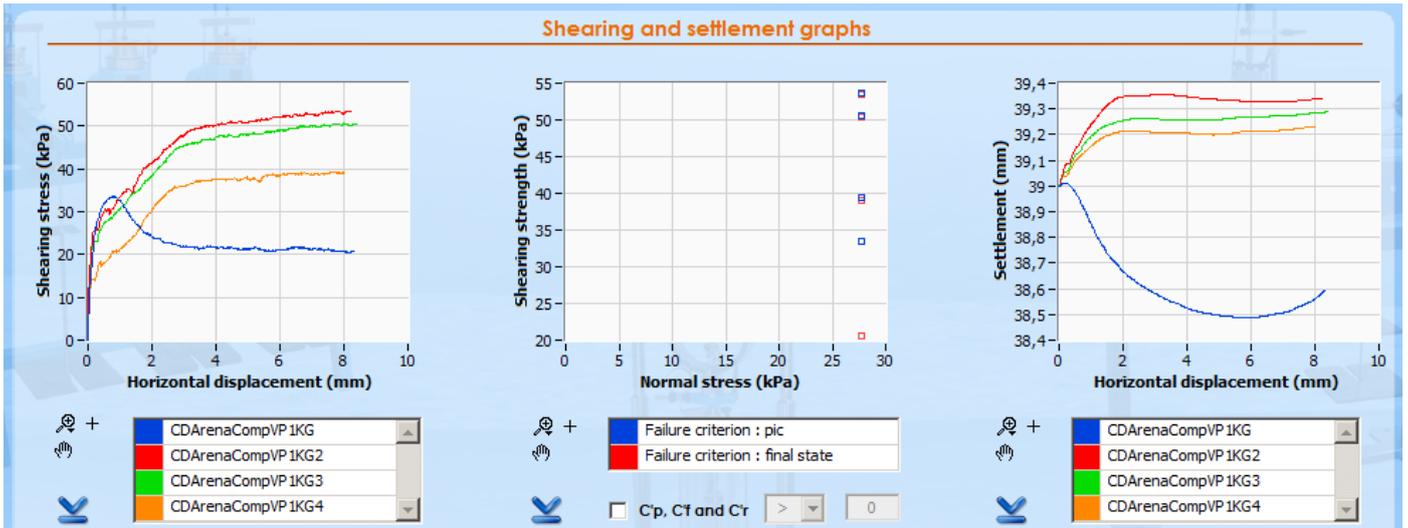
- Peso de casa + arena: 2,605 kg
- Desplazamiento horizontal: 3,321 mm
- Desplazamiento vertical: 7,245 mm - 7,04 mm – 6,93 mm – 6,79 mm – 6,69 mm – 6,58 mm – 6,54 mm – 6,35 mm

Ensayo 3 kg: (8 pasadas)

- Peso de casa + arena: 2,604 kg
- Desplazamiento horizontal: 3,18 mm
- Desplazamiento vertical: 7,272 mm - 7,07 mm – 6,76 mm – 6,49 mm – 6,25 mm – 6,03 mm – 5,83 mm – 5,59 mm

Parámetros	Resultados
Densidad aparente (ρ)	1,92 g/cm ³
Densidad seca inicial (ρ_d)	1,92 g/cm ³
Humedad inicial (w_i)	0%
Índice de huecos inicial (e_1)	0.42 adimensional

Tabla 4.13 Datos propiedades muestra del ensayo 4 kg



Samples identification and results

Samples before consolidation / test :									Samples after consolidation / test :								Results :				
N°	H (mm)	m (g)	ρ (kg/m³)	ρ _d (kg/m³)	w (%)	e	S _r (%)	Shear speed (μm/min)	N°	T100 (min)	ρ _d (kg/m³)	w (%)	σ' (kPa)	τ f,p (kPa)	δl f,p (mm)	τ f,f (kPa)	δl f,f (mm)	C _p (kPa)	C _t (kPa)	φ _p (°)	φ _f (°)
1	39,00	0,000	0,000	0,000	NaN	NaN	NaN	0,9	1	0,000	0,000	NaN	27,78	33,52	0,831	20,63	8,295	NaN	NaN	NaN	-90,000
2	39,00	0,000	0,000	0,000	NaN	NaN	NaN	0,9	2	0,000	0,000	NaN	27,78	53,56	7,722	53,44	8,233				
3	39,00	0,000	0,000	0,000	NaN	NaN	NaN	0,9	3	0,000	0,000	NaN	27,78	50,65	8,008	50,37	8,379				
4	39,00	0,000	0,000	0,000	NaN	NaN	NaN	0,9	4	0,000	0,000	NaN	27,78	39,39	7,957	39,11	8,009				

Comments :

Imagen 4.24. Resultados ensayo VP 1kg (4 pasadas)

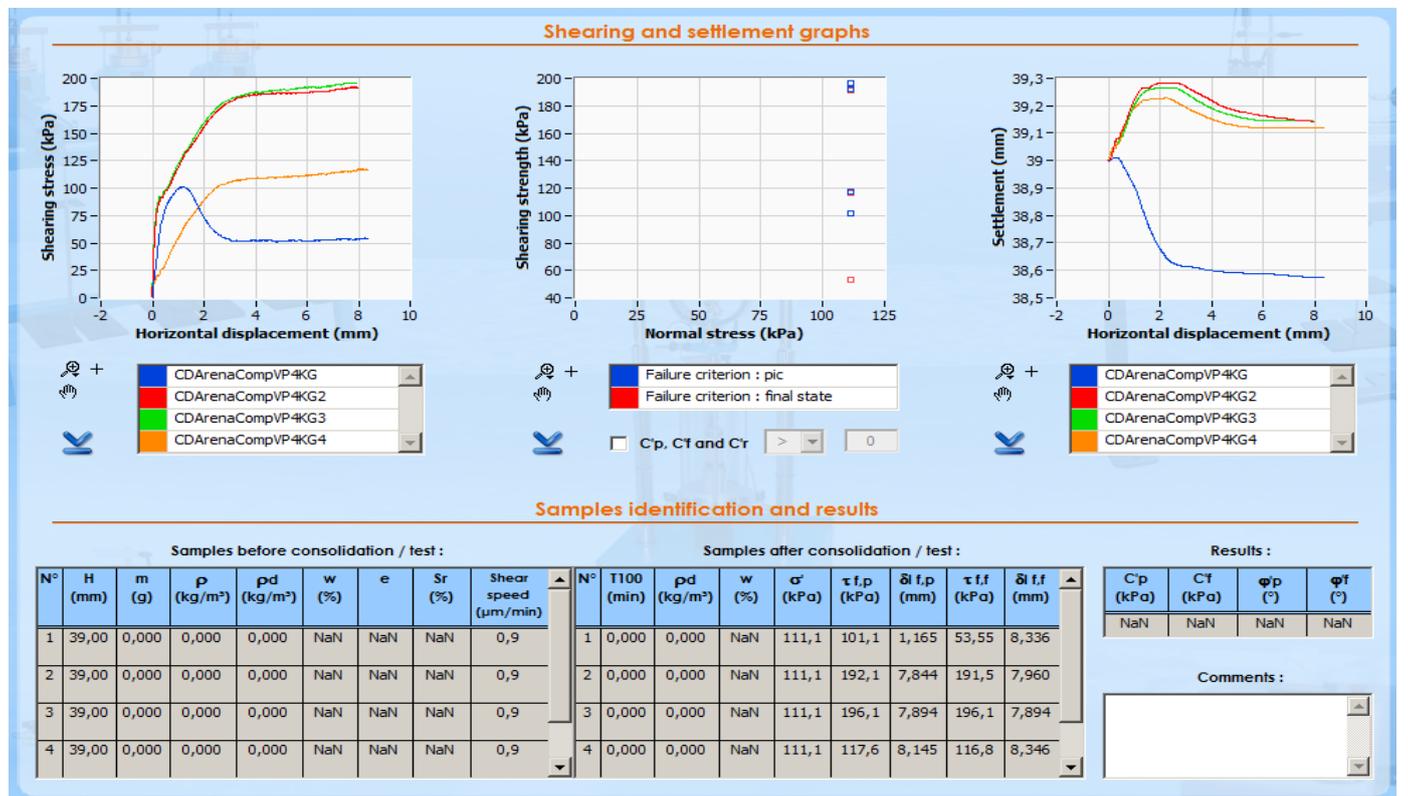


Imagen 4.25. Resultados ensayo VP 4 kg (4 pasadas)

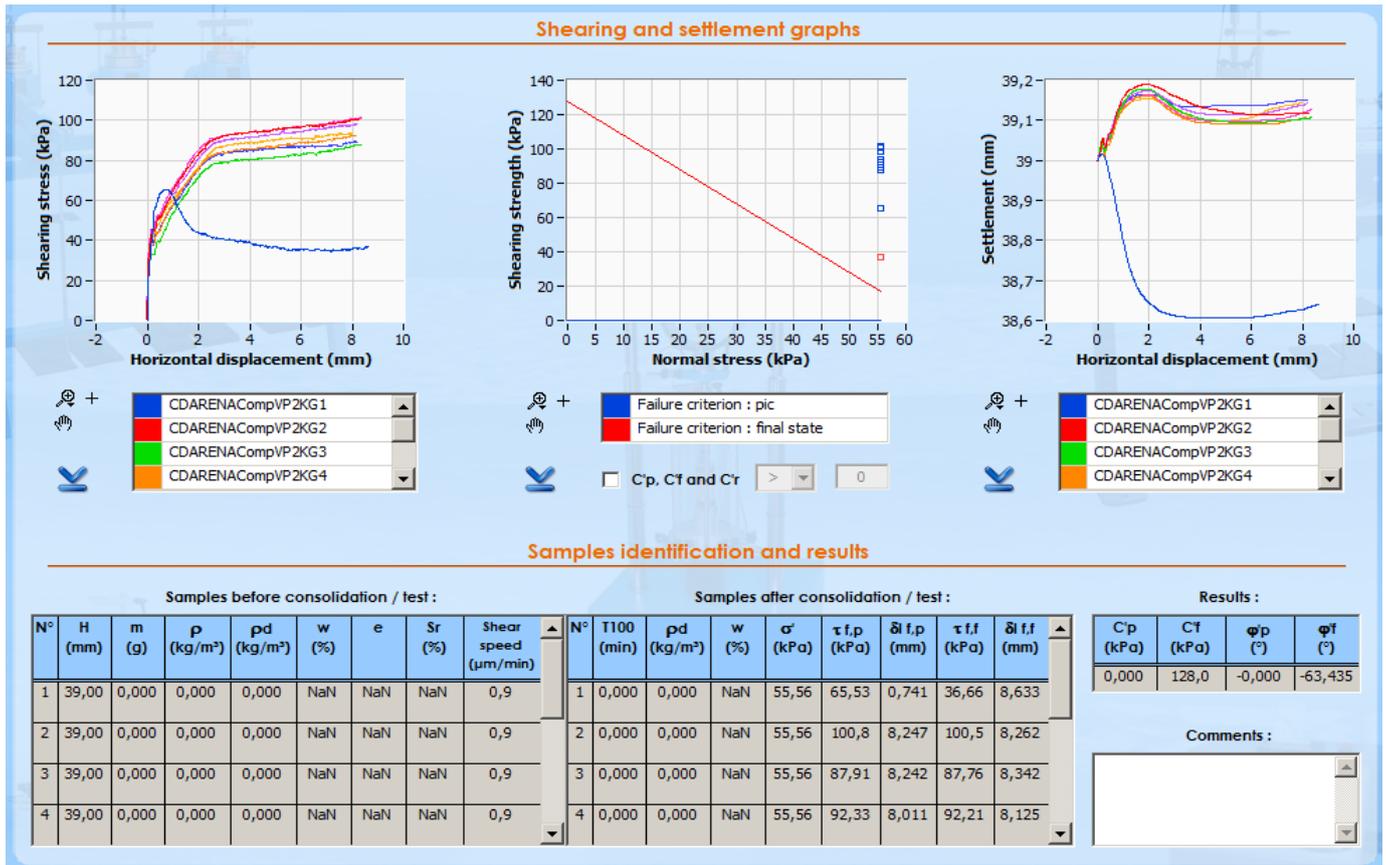


Imagen 4.26. Resultados ensayo VP 2 kg (8 pasadas)

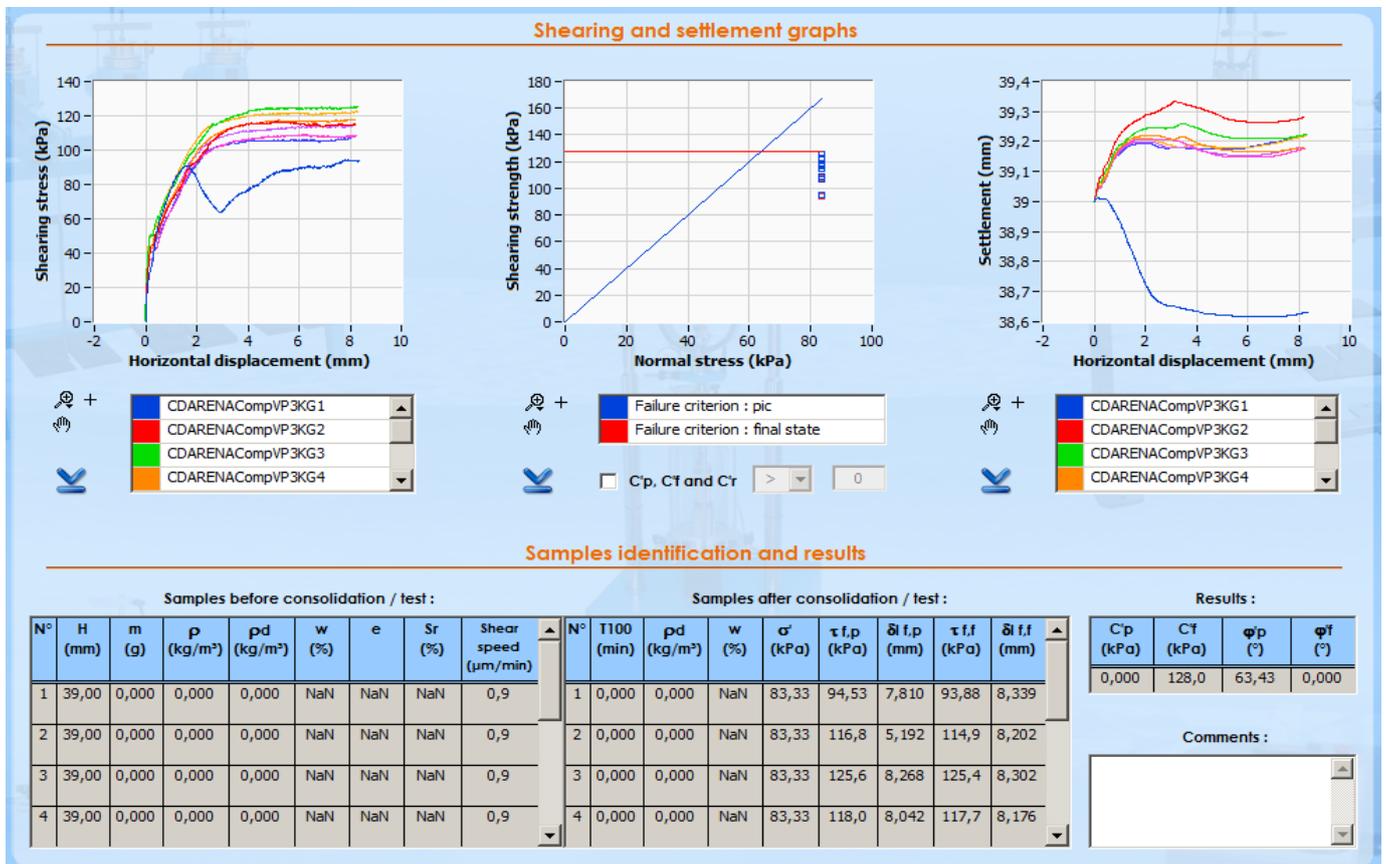


Imagen 4.27. Resultados ensayo VP 3 kg (8 pasadas)

5. Discusión de resultados

El proyecto ha conestado de seis casos, dependiendo del procedimiento de preparación de la muestra y las condiciones que le queramos someter nos darán unos resultados distintos. La muestra la podemos encontrar seca, húmeda o saturada.

A cada caso le hemos aplicado cuatro cargas distintas de 1 kg, 2 kg, 4 kg y 8 kg. Un total de 24 ensayos.

Primero vamos a presentar los 5 primeros casos, al encontrar valores anómalos en el caso de arena compacta seca con varias pasadas lo comentaremos más adelante.

Gráficas Tensión cortante-Desplazamiento horizontal

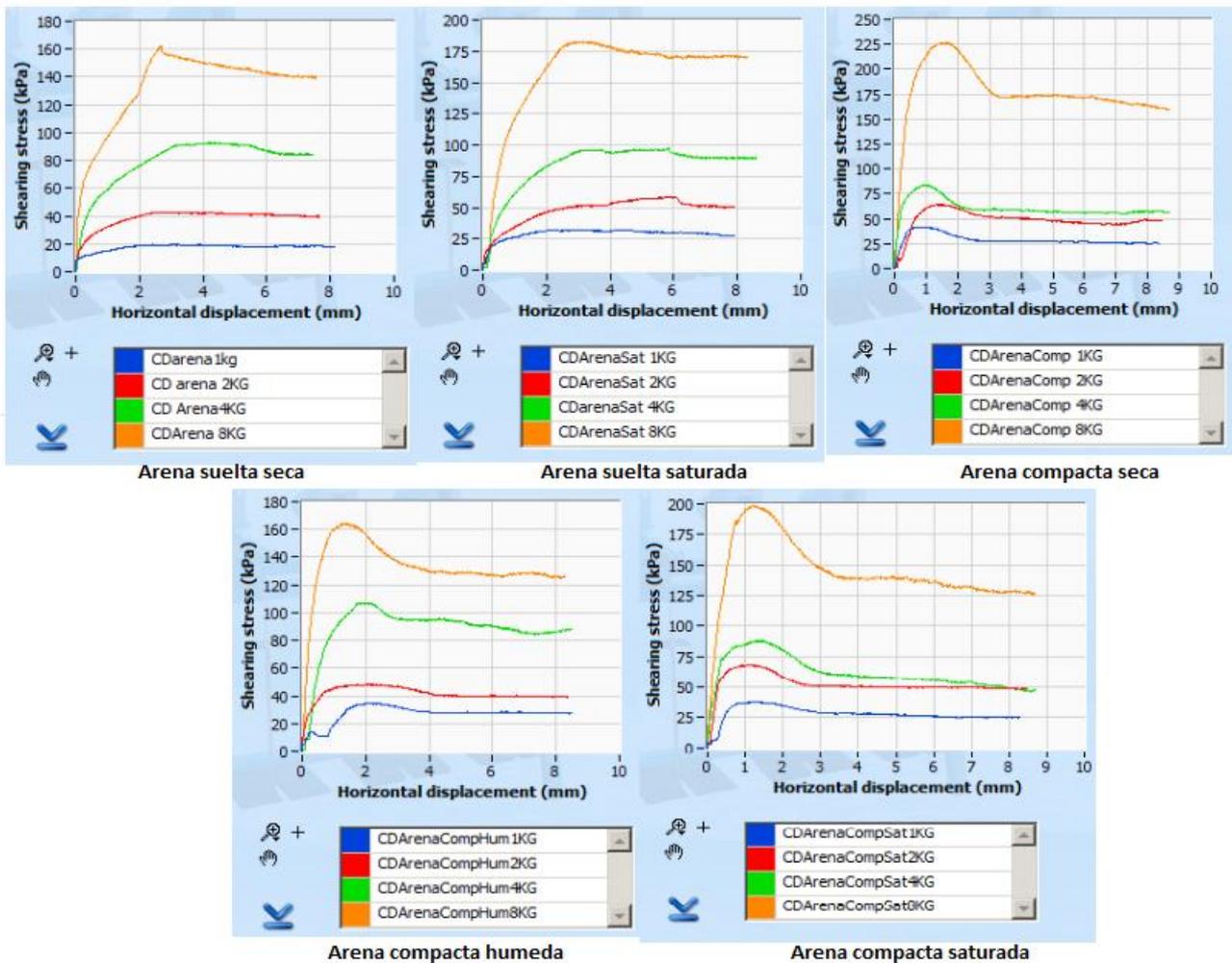


Imagen 5.1. Gráficas de tensión – Desplazamiento

Como podemos observar en la Imagen 5.1 aplicándole más peso, aumenta la tensión normal, lo que equivale a un mayor valor de resistencia pico. En cada uno de los casos se puede observar un valor de resistencia pico y un valor crítico.

En el caso de las arenas sueltas, la tensión aumenta con el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un máximo (valor pico) y a partir de ese momento se mantiene constante aunque el desplazamiento horizontal siga. Por lo que el valor pico y crítico coinciden. En nuestro caso no coinciden por poco, debido a una leve compactación de la arena, probablemente causada durante la preparación de la muestra.

En cuanto a los casos de arenas compactas se puede observar claramente como la tensión aumenta hasta llegar a su valor punta y luego se produce un decrecimiento pronunciado hasta finalmente estabilizarse en el punto de valor crítico.

Podemos observar en la Imagen 5.2 como González de Vallejo lo representa en su libro con la siguiente gráfica:

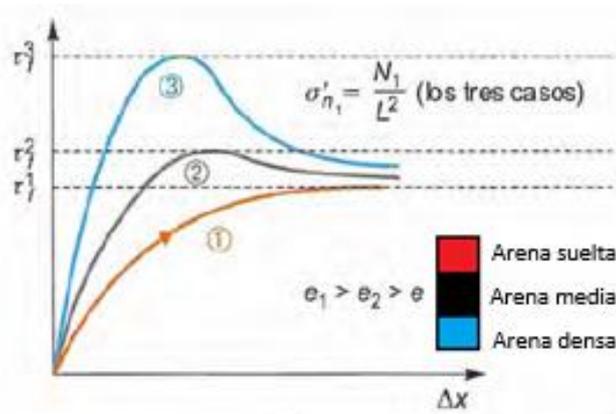


Imagen 5.2. Gráfica tensión-desplazamiento. (González de Vallejo, L.I.)

Gráficas Asentamientos-Desplazamiento horizontal

En la imagen 5.4 se puede observar como en los casos donde la arena está suelta, sufre una compactación y finalmente se acaba expandiendo. En cambio, en arenas densas al estar la arena ya compactada la muestra se expande.

Todo esto es debido al fenómeno de la dilatancia. Por el movimiento relativo de los granos, la muestra contrae durante la primera fase del ensayo, densificándose y disminuyendo la relación de vacíos.

Conforme el desplazamiento avanza, las partículas de arena montan unas sobre otras provocando una expansión de la muestra y alcanzándose la resistencia máxima.

Se puede ver claramente en la Imagen 5.3 el fenómeno de la dilatación explicado por González de Vallejo.

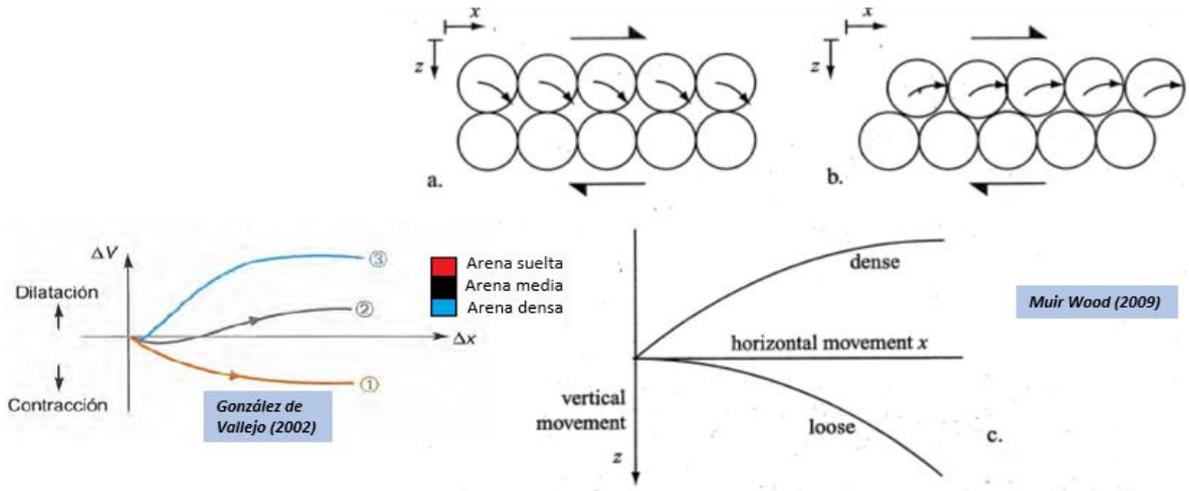


Figure 8.9. (a) Shearing of loosely packed layers of circular discs; (b) shearing of densely packed layers of circular discs; (c) volume change (=vertical movement) in shearing of loosely and densely packed layers of circular discs.

Imagen 5.3. Fenómeno de la dilatación. (González de Vallejo, L.I.)

En el caso “a” de la Imagen 5.3 nos encontramos con una arena suelta donde se ve como sus partículas se acaban asentando unas sobre otras cuando empieza el proceso de corte y acaban estando en la situación del caso “b”. En cambio, en arenas densas ocurre al revés, las partículas acaban montándose unas sobre otras.

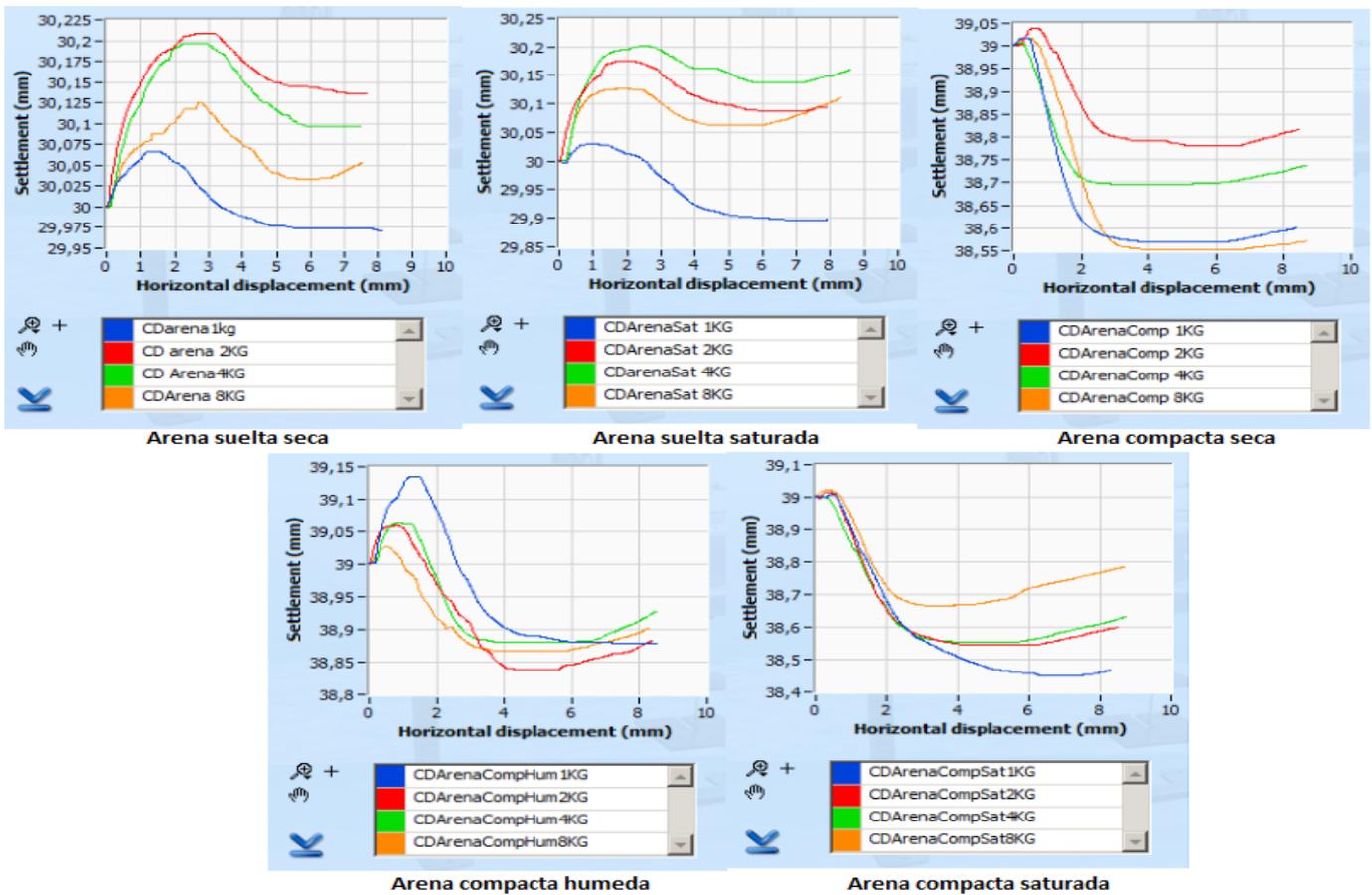


Imagen 5.4. Gráficas Asentamiento- Desplazamiento horizontal

Gráficas envolventes de Mohr

En la Imagen 5.5 aparecen las envolventes de Mohr, tenemos una para los valores picos y otra para los críticos. Podemos observar como en arenas sueltas la diferencia de ángulos de fricción entre ellas es menor debido a que el valor pico y crítico coinciden.

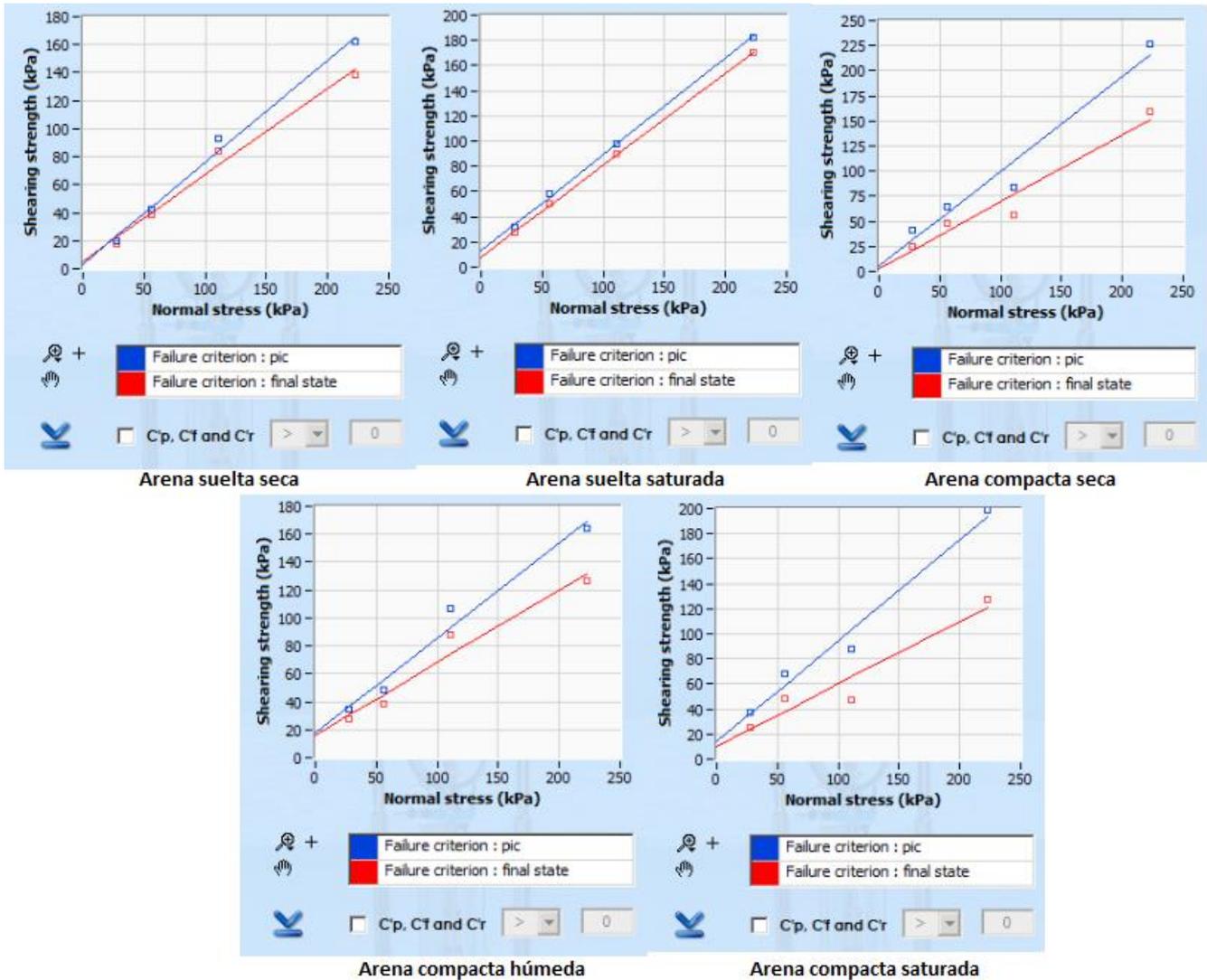


Imagen 5.5. Gráficas envolventes de Mohr

En la Imagen 5.6 se muestran unas tablas con los valores de las cohesiones y ángulos de fricción pico y crítico de todos los casos.

En la Imagen 5.7 se ha representado dichos valores de cohesión y ángulo de rozamiento junto a sus respectivas fórmulas.

Results :			
C _p (kPa)	C _f (kPa)	φ _p (°)	φ _f (°)
3,226	5,416	36,12	31,70

Arena suelta seca

Results :			
C _p (kPa)	C _f (kPa)	φ _p (°)	φ _f (°)
12,96	8,197	37,43	36,20

Arena suelta saturada

Results :			
C _p (kPa)	C _f (kPa)	φ _p (°)	φ _f (°)
5,188	2,442	43,48	33,89

Arena compacta seca

Results :			
C _p (kPa)	C _f (kPa)	φ _p (°)	φ _f (°)
17,37	16,00	34,37	27,53

Arena compacta húmeda

Results :			
C _p (kPa)	C _f (kPa)	φ _p (°)	φ _f (°)
13,78	9,761	38,96	26,60

Arena compacta saturada

Imagen 5.6. Cohesión y ángulo de fricción pico y residual

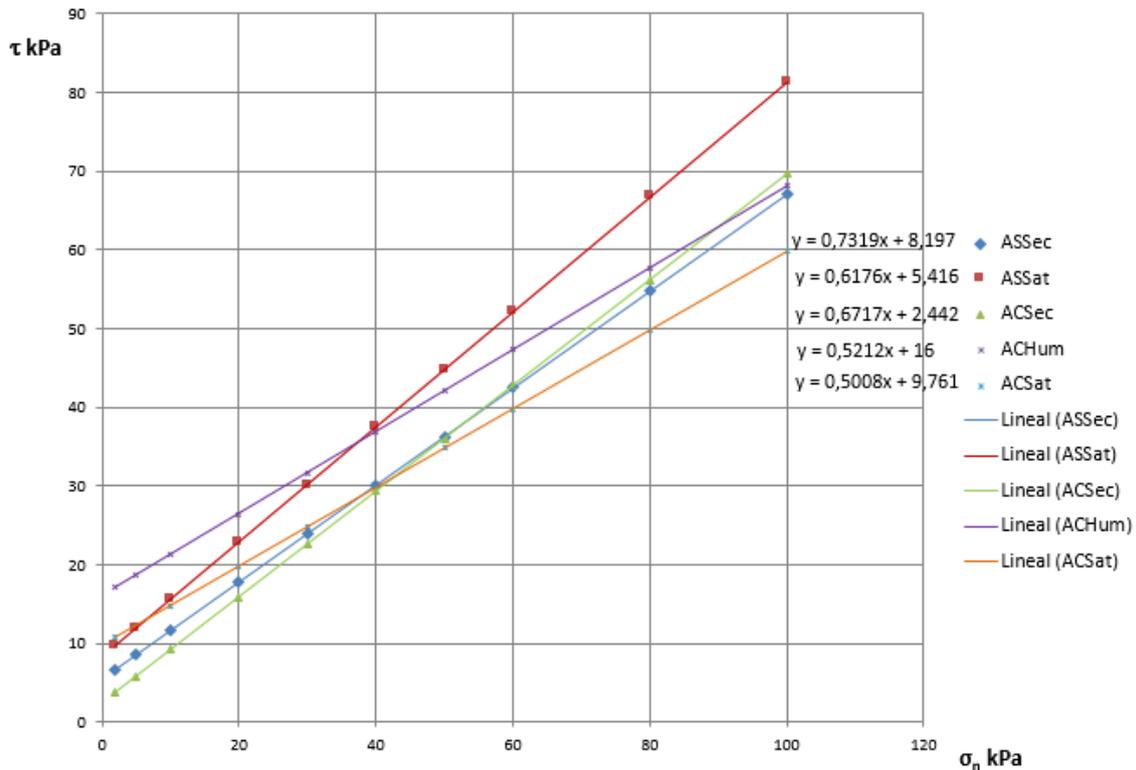


Imagen 5.7. Representación de valores de cohesión y ángulo de rozamiento

Nuestros resultados arrojan valores de cohesión bajos, cosa que no debería suceder ya que la cohesión en arenas debe ser nula. Analizando los resultados y comparándolos con los del laboratorio Horysu, se puede ver como ante valores de tensiones bajas y medias puede haber cohesión, pero si tomamos los datos con tensiones más altas se observa que la cohesión va disminuyendo hasta ser nula.

En la Imagen 5.8 se puede ver como tomando los valores de tensiones altas, hemos trazado una línea verde en la que se observa como la cohesión es cero.

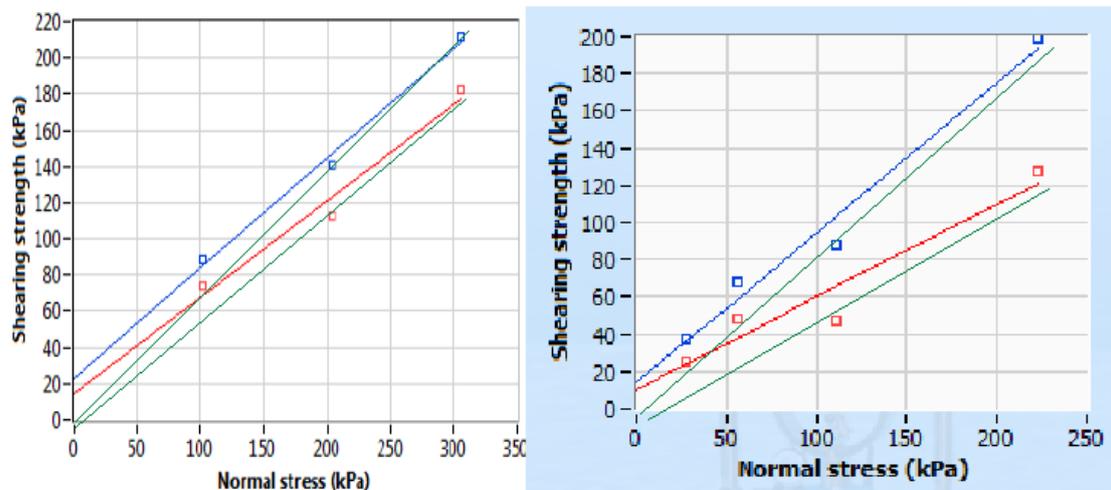


Imagen 5.8. Envolventes de Mohr de los ensayos de Horysu

Ahora vamos a comentar los datos arrojados por el ensayo de arena compacta seca con varias pasadas, en el cual nos han salido valores un poco anómalos.

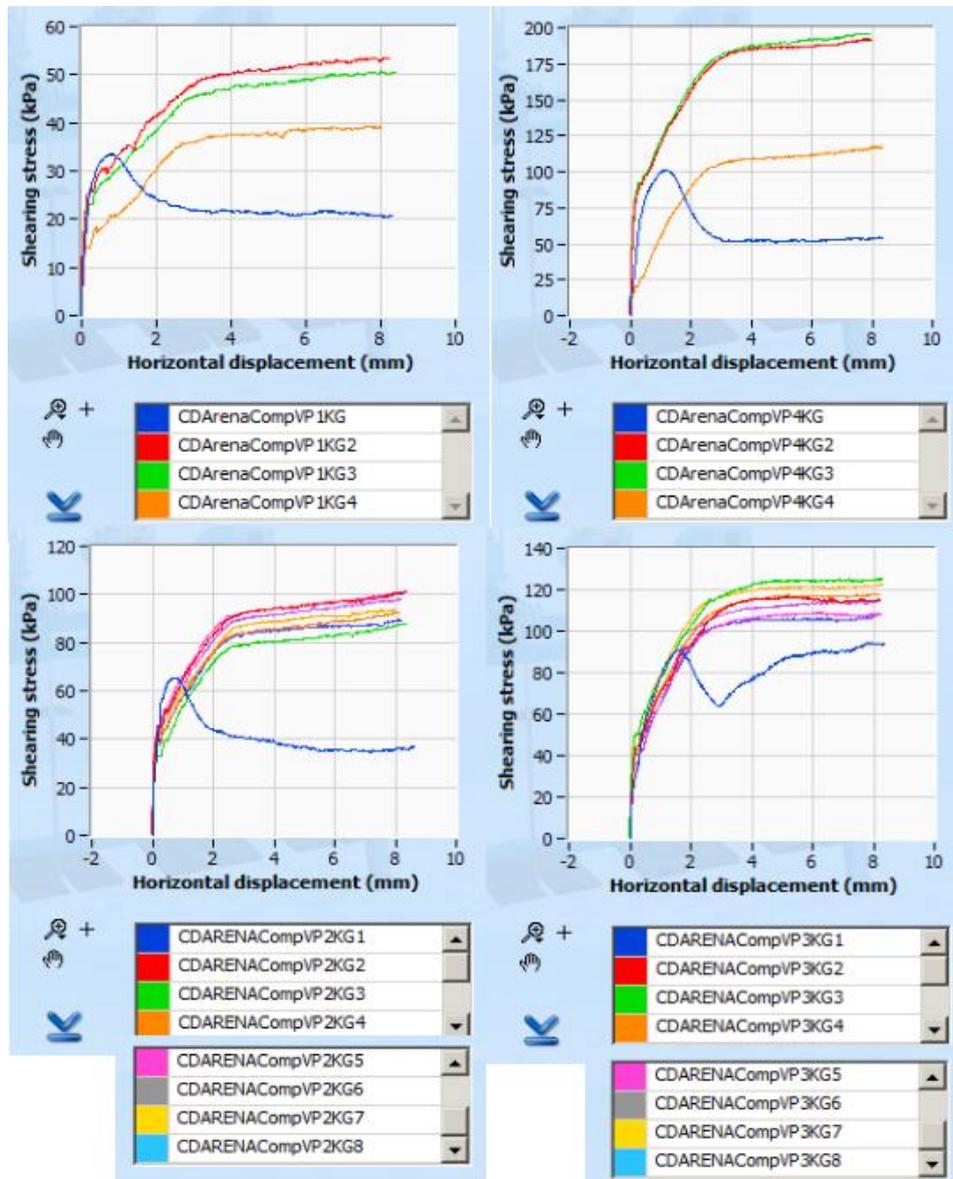


Imagen 5.9. Gráficas de tensión, ensayo Arena Compacta Seca VP

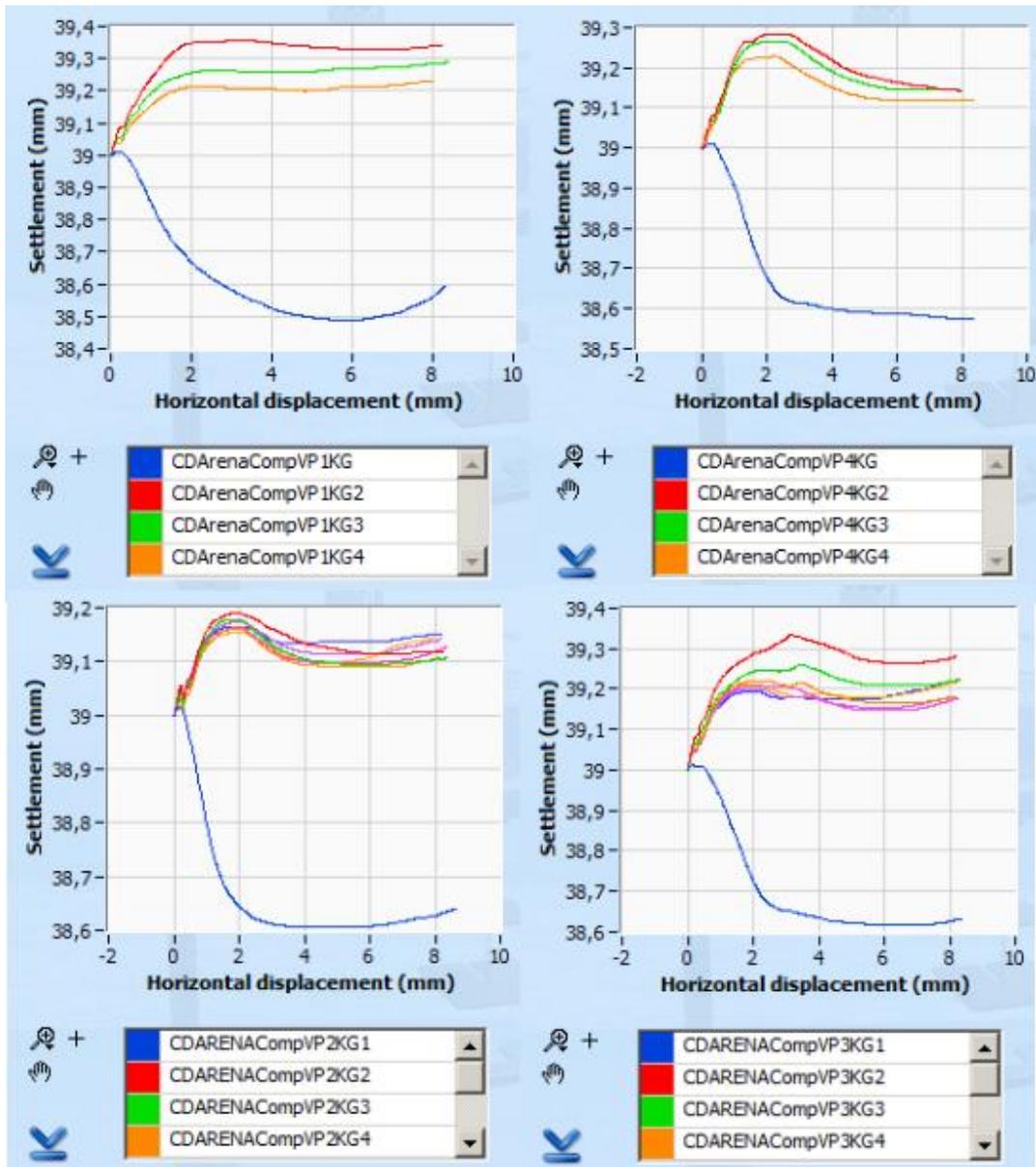


Imagen 5.10. Gráficas de asentamiento, ensayo Arena Compacta Seca VP

Una vez realizado el ensayo y comparándolo con la teoría descrita en el libro de Vallejo podemos decir que el procedimiento que hemos llevado a cabo ha sido erróneo y los datos arrojados no son correctos.

Vallejo explica en su libro que en un ensayo de varias pasadas el valor pico se encontrará en la primera pasada y se producirá una disminución considerable de la tensión al haber provocado un plano de rotura en la arena. Se puede observar en la Imagen 5.11.

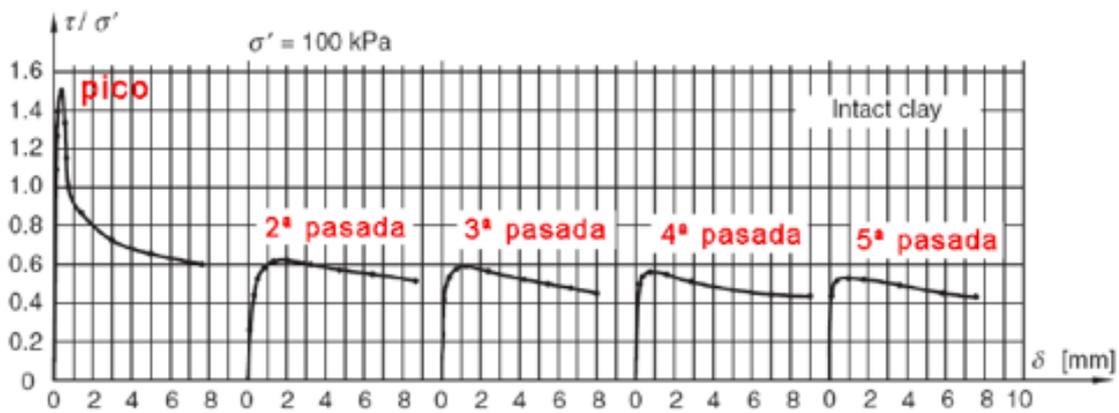


Imagen 5.11. Resultados del ensayo de varias pasadas. (González de Vallejo, L.I.)

Para ilustrar el comportamiento tenso-deformacional (gráficas tensión-desplazamiento y deformación vertical-desplazamiento) de la arena en nuestros ensayos vamos a usar los resultados de unos análisis que nos han proporcionado los laboratorios Horysu.

Dichos ensayos realizados por los laboratorios Horysu han sido realizados con arenas procedentes del fondo marino del puerto de escombreras. Esta muestra contiene un 68,1% de arenas, 29,9% de finos y 2% de gravas, con una humedad del 15,95%.

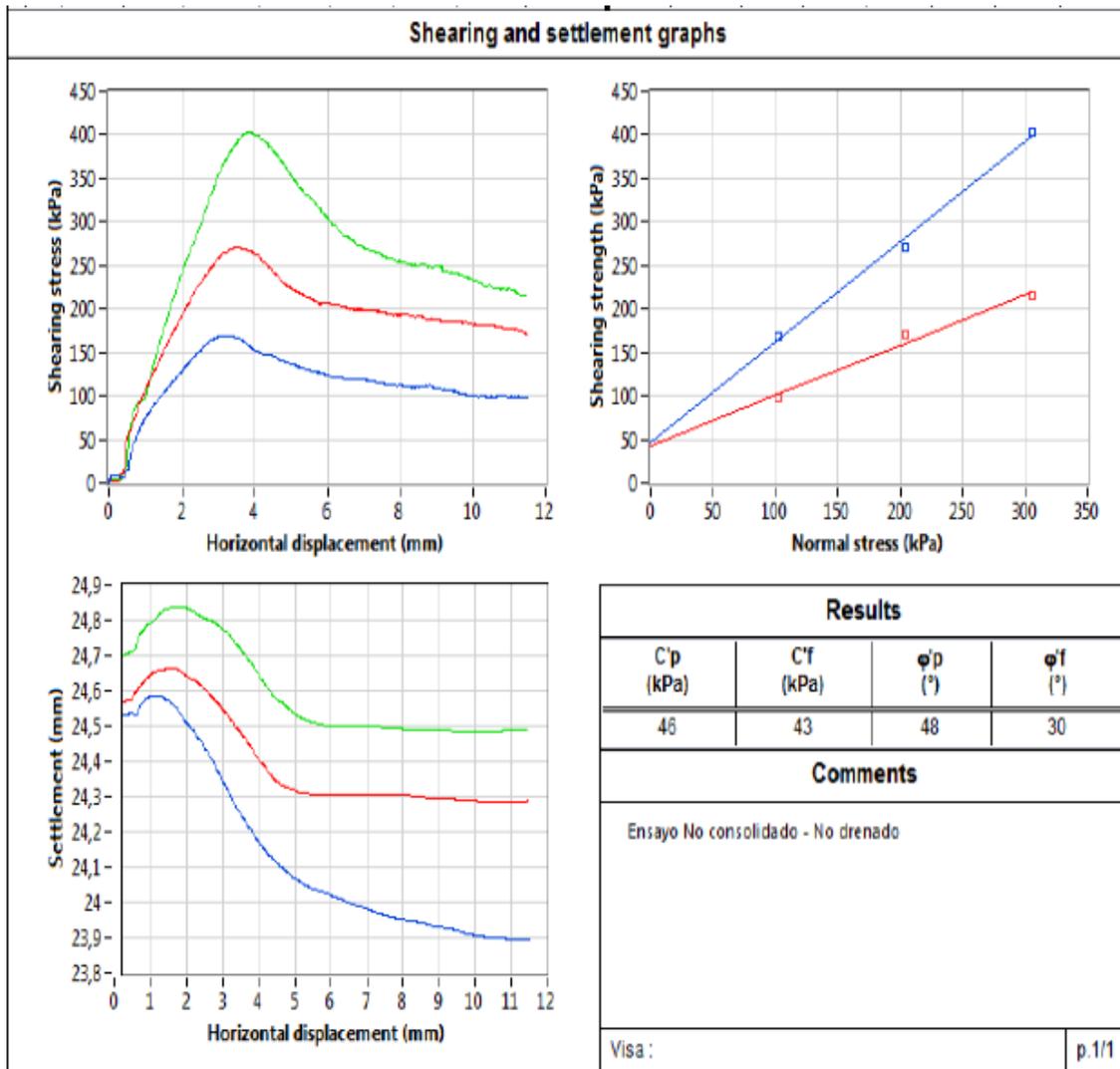


Imagen 5.12. Ensayo realizado por Laboratorios Horysu

En la Imagen 5.12 se corrobora como el comportamiento es de una arena densa, donde las tensiones ascienden hasta un valor pico y luego descienden hasta un valor crítico. La diferencia entre los ángulos de fricción es considerable como se puede observar en las envolventes de Mohr. La arena se expande al estar compactada. Los resultados son muy similares a los nuestros.

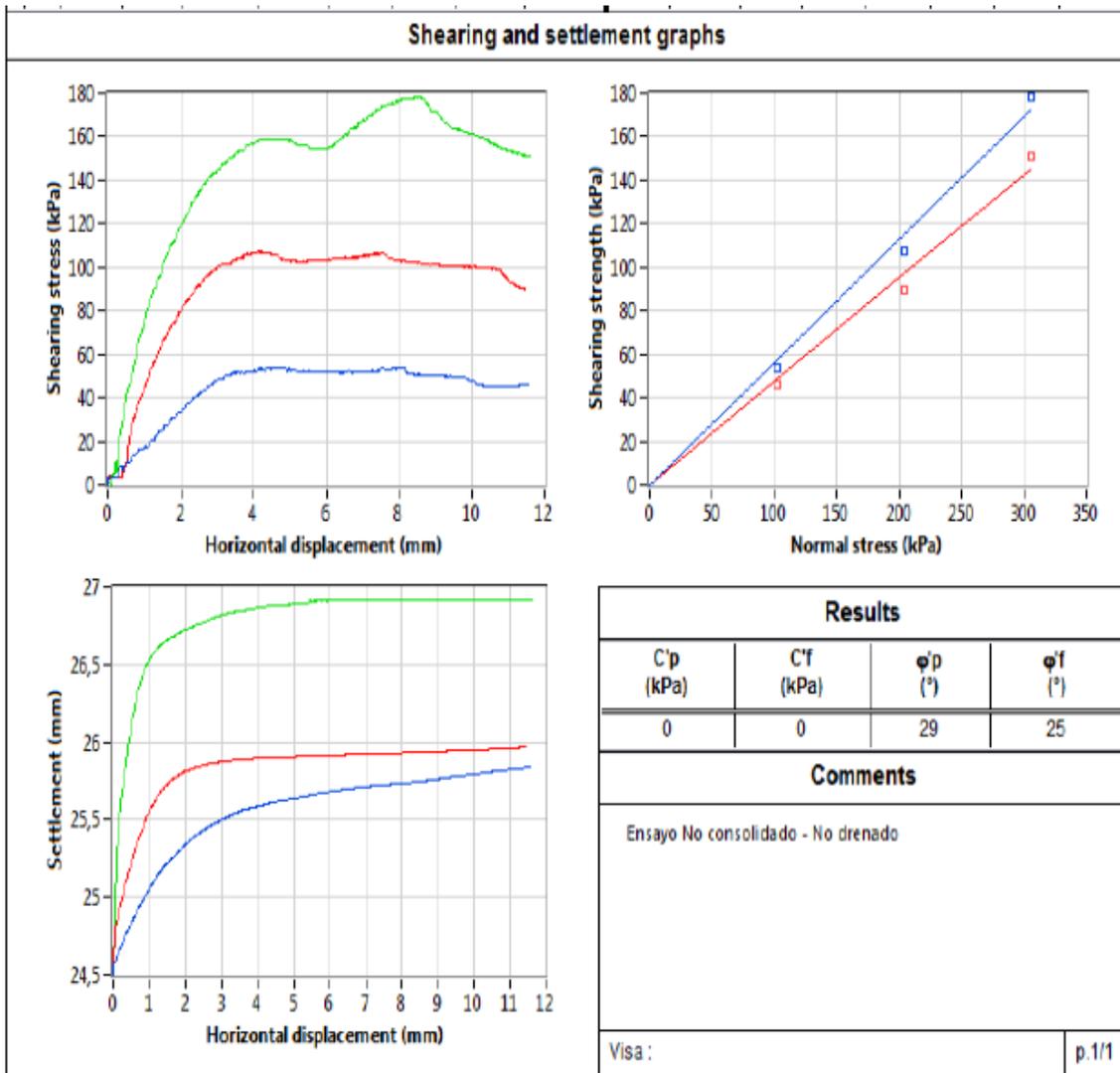


Imagen 5.13. Ensayo realizado por Laboratorios Horysu

En la Imagen 5.13 se puede observar que nos encontramos con un ensayo Consolidado – Drenado, cuya gráfica de Asentamiento- Desplazamiento nos hace ver que se trata de una arena media-suelta. Posee un valor pico y otro residual que están muy cercanos, lo cual se aproxima a nuestros ensayos realizados con arenas sueltas. Posee unos valores de cohesión nulos y un ángulo de fricción inferior a los nuestros.

6. Conclusiones y comentarios finales

El objetivo principal del trabajo ha sido el análisis del comportamiento de arenas mediante la mesa de corte directo y los diferentes ensayos llevados a cabo.

En el caso de las arenas sueltas la tensión aumenta con el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un máximo (valor pico) y a partir de ese momento se mantiene constante aunque el desplazamiento horizontal siga. Por lo que el valor pico y crítico coinciden.

Conforme avanza la deformación horizontal la muestra sufre una compactación y finalmente se acaba expandiendo. Sus partículas se acaban asentando unas sobre otras cuando empieza el proceso de corte.

En las envolventes de Mohr se observa que la diferencia de ángulos de fricción entre ellas es menor debido a que el valor pico y crítico coinciden. Los valores obtenidos para una arena suelta seca son: $C_p = 3,226$; $C_f = 5,416$; $\phi_p = 36,12$; $\phi_f = 31,7$ y para una arena suelta saturada son: $C_p = 12,96$; $C_f = 8,197$; $\phi_p = 37,43$; $\phi_f = 36,2$.

Para las arenas densas se aprecia cómo la tensión aumenta hasta llegar a su valor punta y luego se produce un decrecimiento pronunciado hasta finalmente estabilizarse en el punto de valor crítico.

La diferencia entre los ángulos de fricción es más acusada que en el caso de las arenas sueltas debido a la existencia de un valor pico y crítico diferentes.

Durante el desplazamiento la arena se expande al estar la arena ya compactada. Se produce el fenómeno de la dilatancia.

Para una arena compacta seca: $C_p = 5,188$; $C_f = 2,442$; $\phi_p = 43,48$; $\phi_f = 33,89$, para una arena compacta húmeda: $C_p = 17,37$; $C_f = 16$; $\phi_p = 34,37$; $\phi_f = 27,53$ y para una arena compacta saturada: $C_p = 13,78$; $C_f = 9,761$; $\phi_p = 38,96$; $\phi_f = 26,6$.

Nuestros resultados arrojan valores de cohesión bajos, cosa que no debería suceder ya que la cohesión en arenas debe ser nula. Como hemos explicado, ante valores de tensiones bajas y medias puede haber cohesión, pero si tomamos los datos con tensiones más altas se observa que la cohesión va disminuyendo hasta ser nula.

Se ha utilizado información procedente de ensayos de los laboratorios Horysu para comparar los resultados de este trabajo, obteniéndose conclusiones similares.

7. 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.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. UNE 103302:1994: Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo. Madrid, 1994. 3 p.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. UNE 103101: Análisis granulométrico de suelos por tamizado. Madrid, 1995. 10 p.