

Puesta en funcionamiento de la mesa de corte
directo. Calibración de medidores y
programación del software para registro de
medidas.

Alumno: Jose Ángel Montalbán Valverde

Director: Iván Alhama Manteca

Codirector: Gonzalo García Ros

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mi familia que siempre me ha apoyado y ayudado a lo largo de mi vida. Sin ellos no hubiera conseguido llegar hasta aquí.

También me gustaría dar las gracias al director de este trabajo, Iván Alhama Manteca y al codirector, Gonzalo García Ros, por el tiempo dedicado a este proyecto.

Por último agradecer a los técnicos de Mecánica Científica la ayuda ofrecida.

Índice

1	Introducción y objetivos.....	1
2	Fundamentos teóricos.....	2
2.1	Resistencia al corte del terreno.....	2
2.1.1	Criterio de rotura	2
2.1.2	Comportamiento de los suelos sometidos a corte.....	5
2.1.3	Otros ensayos	9
2.2	El ensayo de corte directo	13
2.3	Norma UNE 103401.....	17
2.3.1	Objetivo y campo de aplicación.....	17
2.3.2	Modalidades de ensayo que contempla esta norma.....	17
2.3.3	Operaciones y medidas iniciales	18
2.3.4	Preparación y montaje de las probetas para el ensayo	19
2.3.5	Procedimientos operatorios	21
2.3.6	Obtención y expresión de los resultados	23
3	Aparato Cyber-Plus evolution para registro de deformaciones y resistencia del terreno.....	25
3.1	Ajuste de instrumentación y calibración del aparato.....	28
4	Software para la realización de informes de resultados. ShearLab reports.....	32
5	Puesta en marcha de la Máquina de corte directo	40
5.1	La máquina de corte directo	40
6	Pruebas de laboratorio	42
6.1	Metodología de trabajo.....	42
6.1.1	Selección y preparación de la muestra.	42
6.1.2	Datos de propiedades índices de la muestra.....	46
6.1.3	Realización del ensayo	47
6.2	Discusión de resultados.....	53
7	Conclusiones y comentarios finales	57
8	Referencias	58
9	Anexos.....	59

1 Introducción y objetivos

La mesa de corte directo permite llevar a cabo uno de los ensayos básicos para la obtención de parámetros resistentes del terreno bajo distintas condiciones. Las medidas obtenidas, básicamente el ángulo de rozamiento, la cohesión y la envolvente de rotura, permiten realizar cálculos geotécnicos de cimentaciones, estabilidad de taludes, diseño de muros, etc.

El laboratorio de Geotecnia de la Escuela de Caminos y Minas de la UPCT cuenta desde 2011 con una mesa de corte suministrada por Mecánica Científica S.A. que, hasta la fecha y por diferentes circunstancias, no se había puesto en funcionamiento. El presente trabajo tiene por objeto la puesta en marcha de la misma. Para ello se han adquirido tres equipos de laboratorio nuevos: dos deformímetros piezoeléctricos para la obtención de las deformaciones verticales y horizontales de la muestra durante la ejecución del ensayo, un módulo de adquisición de datos para la traducción de deformaciones y tensiones soportadas por la muestra durante el ensayo y un software que permite, mediante el tratamiento de los datos obtenidos, la elaboración de un informe completo con la interpretación de los mismos.

El objetivo principal del presente proyecto de fin de grado es el de poner en funcionamiento el equipo de corte directo y las nuevas herramientas adquiridas para el registro e interpretación de las deformaciones y tensiones durante la ejecución del ensayo. Para llevar a cabo esta tarea, el alumno desarrollará otros objetivos secundarios, como son el repaso de la teoría de la resistencia al corte del terreno, el aprendizaje del funcionamiento de la mesa de corte mediante el uso de la normativa y el apoyo del profesorado del área, y el manejo del módulo de adquisición de datos y el software para la interpretación de los mismos.

El alcance de estos objetivos permitirá al alumno llevar a cabo un ensayo completo en arenas sueltas que ponga en práctica los conocimientos adquiridos y realizar un guión de uso del módulo de adquisición de datos y el software para la interpretación de los mismos. Esta guía de funcionamiento servirá para posteriores trabajos, ya sean relacionados con la docencia del área como con la investigación o asesoramiento externo.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Resistencia al corte del terreno

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

2.1.1 Criterio de rotura

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

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

Donde:

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,

σ' = tensión efectiva

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:

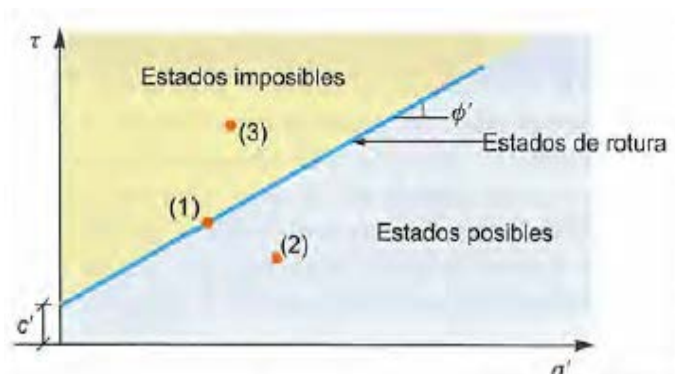


Figura 2.1 Criterio de rotura en suelo (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

- 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 en tanto en cuanto se sitúa por 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.

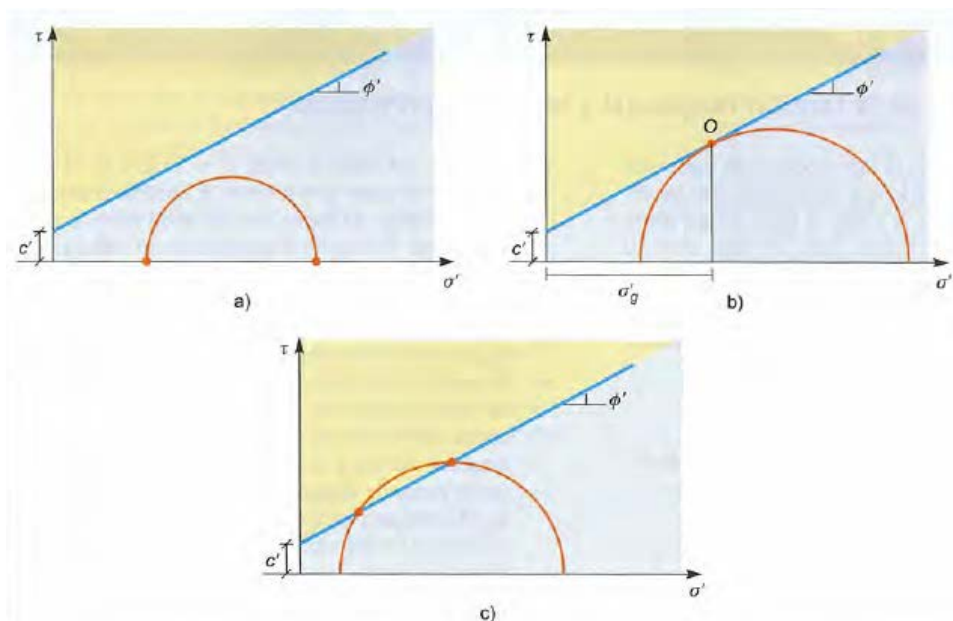


Figura 2.2 La envolvente de rotura y el círculo de Mohr (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

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.

2.1.2 Comportamiento de los suelos sometidos a corte

A pesar de las limitaciones del ensayo de corte directo, su simplicidad facilita el establecimiento conceptual de ciertas pautas de comportamiento del suelo, que después pueden ampliarse al resto de formas de sollicitación. En los párrafos siguientes se describen estas pautas para los dos grupos de suelos principales: granulares y arcillosos.

Suelos granulares

Supóngase que se ensayan tres muestras de la misma arena en tres condiciones distintas de densidad. Por simplicidad se supondrá que las tres muestras se ensayan en condiciones drenadas, de manera que las tensiones totales y efectivas coincidirán en todo momento.

La muestra 1 se encuentra en un estado muy flojo, con un índice de poros (e_1) elevado. La muestra 2, constituida por la misma arena, es algo más densa que la anterior, de forma que tiene menos volumen de huecos y su Índice de poros (e_2) es menor que el de la muestra 1. La última muestra, 3, es muy densa, con menor volumen de huecos que las dos anteriores y por tanto con el menor Índice de poros (e_3) de las tres. A continuación se montan las tres muestras en sendos aparatos de corte directo, se les aplica la misma tensión efectiva normal:

$$\sigma'_{n1} = \frac{N_1}{L_2}$$

y, finalmente, se las somete a corte de la forma descrita anteriormente.

En la Figura 2.3 se representan cualitativamente los resultados de estos ensayos. La Figura 2.3a) muestra las curvas tensión tangencial movilizada-desplazamiento horizontal. La Figura 2.3b) representa la relación desplazamiento horizontal-cambio de volumen. La Figura 2.3c) muestra el recorrido tensional sufrido en un plano (σ', τ).

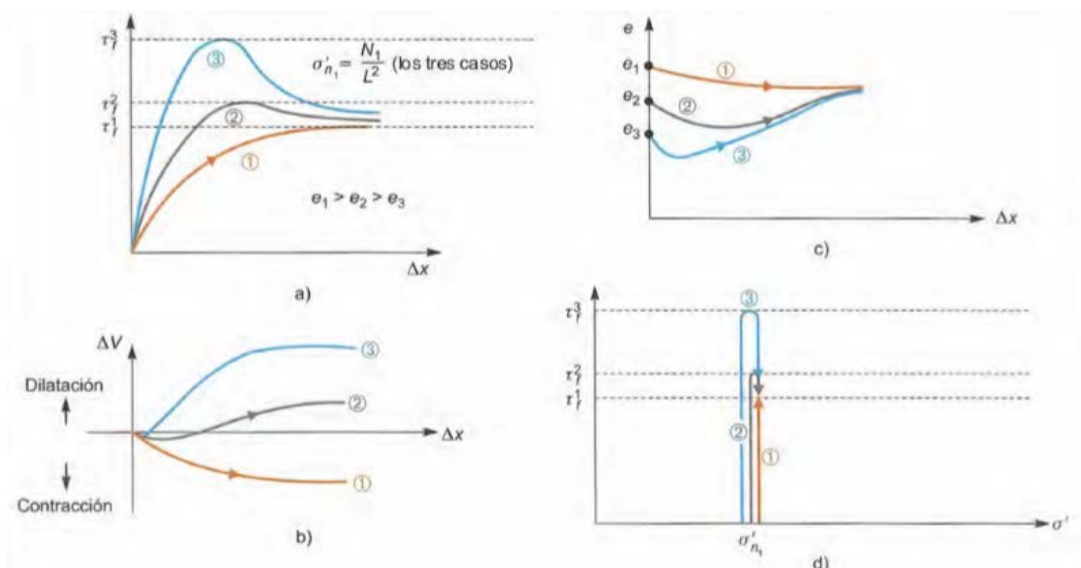


Figura 2.3 Curvas de ensayo de corte drenado sobre muestras granulares de distinta densidad inicial (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

El índice de poros en cada momento del ensayo se puede obtener de forma sencilla aplicando la expresión:

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

siendo:

H_0 , la altura inicial de la muestra.

e_0 , el índice de poros inicial de cada muestra (e_1, e_2 y e_3 respectivamente en este caso).

ΔH , el desplazamiento vertical medido (positivo si es de compresión).

De la observación detallada de los gráficos anteriores se pueden deducir los siguientes aspectos de interés:

- Muestra de baja densidad (1):
 - La tensión tangencial movilizada aumenta con el desplazamiento horizontal (Δx) hasta alcanzar un valor máximo (τ_f^1). A partir de ese instante se mantiene constante aunque el desplazamiento horizontal prosiga.
 - Desde el inicio del ensayo se observa un asiento de la placa de reparto, es decir, la muestra reduce su volumen al ser sometida a tensiones cortantes. Se llega a una cierta magnitud del desplazamiento horizontal a partir del cual no se observan cambios apreciables de volumen.
- Muestra de densidad media (2):

- Como en la muestra (1), la tensión tangencial movilizada aumenta con el desplazamiento horizontal (Δx). En este caso la pendiente de la curva (τ , Δx) es mayor, y además se alcanza una tensión tangencial máxima (resistencia de «pico» = τ_f^2) claramente superior a (τ_f^1). Estas observaciones indican que la muestra (2), más densa que la (1), resulta también más rígida y resistente. Sin embargo, si prosigue el desplazamiento horizontal, la tensión tangencial movilizada decrece hasta que termina por converger con (τ_f^1).
- Al principio del ensayo se producen asientos de la placa de reparto, o lo que es lo mismo, la muestra disminuye de volumen (contrae). Sin embargo, llegado a un punto pueden comenzar a producirse levantamientos o aumentos de volumen (dilatación). Finalmente y como en el caso anterior, con suficiente desplazamiento se alcanza un estado a partir del cual no se observan cambios apreciables de volumen.
- La Figura 2.3c reproduce en términos del índice de poros los cambios de volumen descritos en el párrafo anterior, pero además muestra un aspecto interesante del comportamiento cualitativo de los suelos granulares. Así, en el estado descrito en que dejan de producirse cambios apreciables de volumen y convergen las tensiones tangenciales de las muestras (1) (2), también convergen los índices de poros de ambas.
- Muestra de densidad elevada (3):
 - Este último ensayo muestra una mayor pendiente de la curva (τ , Δx), así como la máxima tensión tangencial movilizada. De hecho, se puede observar una resistencia de «pico» (τ_f^3) muy superior a las máximas tensiones tangenciales alcanzadas en los otros dos ensayos. En definitiva, la muestra más densa revela un comportamiento más rígido, y resulta sustancialmente más resistente. En cualquier caso, como en los ensayos realizados sobre muestras menos densas, con suficiente desplazamiento horizontal la tensión tangencial movilizada decrece hasta que termina por converger con (τ_f^1).
 - Al principio del ensayo se pueden producir pequeños descensos de la placa de reparto, quizás debidos a reajustes en el aparato de corte, pero rápidamente comienzan a registrarse ascensos netos de la misma. Este comportamiento indica que la muestra densa resulta claramente dilatante, tendiendo a aumentar de volumen cuando se la somete a corte. Como en los casos anteriores, con suficiente desplazamiento se alcanza un estado a partir del cual cesan los cambios apreciables de volumen.
 - También la muestra densa tiende a converger hacia un único índice de poros y llegar a ese estado en el que mayores desplazamientos no producen más cambios

de volumen ni modificaciones en la tensión tangencial, que se mantiene aproximadamente igual a (τ_f^1) .

Estos tres ensayos de corte podrían repetirse en muestras idénticas a las anteriores pero sometidas a tensiones efectivas normales mayores. La Figura 2.4 representa esquemáticamente las tres envolventes de rotura resultantes, mostrando cómo el ángulo de rozamiento (de pico) depende directamente de la densidad inicial del suelo. Como se ha visto, la relación entre la densidad o compacidad inicial de un determinado suelo granular y su resistencia es muy acusada. Tanto es así que en la práctica habitual se dispone de correlaciones aproximadas entre dicha compacidad, determinada a través de ensayos in situ como el SPT, y el ángulo de rozamiento interno, tal y como muestra el Cuadro 2.1.

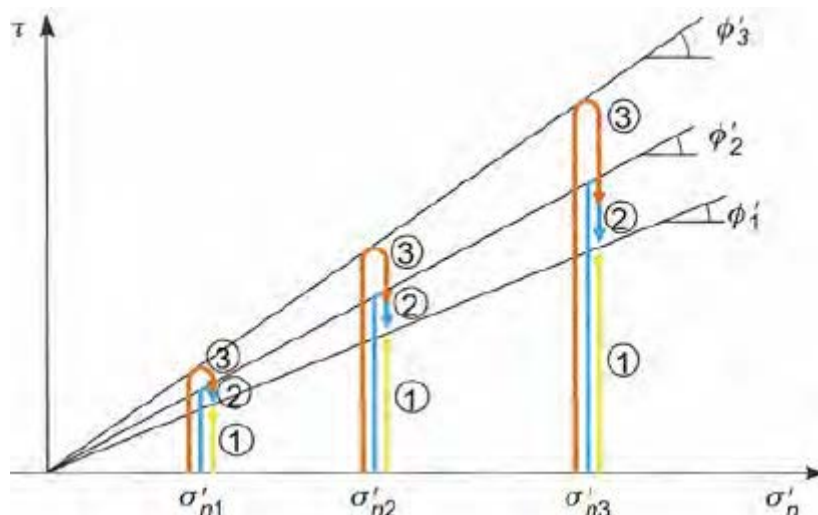


Figura 2.4 Envolventes de rotura en función de la densidad inicial (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

Correlación entre el SPT y el ángulo de rozamiento interno de suelos granulares

N(SPT)	Compacidad	ϕ' (°)
0-4	Muy floja	28
4-10	Floja	28-30
10-30	Medianamente densa	30-36
30-50	Densa	36-41
> 50	Muy densa	> 41

Cuadro 2.1 (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

Aunque la compacidad es un factor primario indiscutible, la mayor o menor resistencia de un suelo granular depende también de algunos otros factores, entre los que cabe destacar la forma de las partículas, la distribución granulométrica y el tamaño de los granos. En los tres casos citados la influencia sobre la resistencia es sencilla e intuitiva. Así, en lo que respecta a la forma resulta evidente que será más sencillo hacer deslizar o rodar entre sí partículas redondeadas que granos angulosos e irregulares, de manera que un suelo constituido por estos últimos mostrará mayor resistencia al corte. Con relación a la granulometría, en un suelo uniforme la mayoría de las partículas son de tamaño similar, de forma que el tamaño del hueco máximo entre partículas depende directamente del tamaño de éstas. Un suelo bien graduado, sin embargo, posee partículas de muchos tamaños distintos, con lo que los granos medianos pueden ocupar los poros de las partículas más gruesas, las partículas más finas los huecos entre las medianas, y así de forma sucesiva. Lógicamente esta mejor posibilidad de estibación da lugar a que en un suelo bien graduado se pueda alcanzar una estructura más densa y más resistente que en un suelo uniforme. Finalmente, resultará más difícil hacer deslizar y rodar entre sí partículas de gran tamaño que partículas pequeñas.

Valores del ángulo de rozamiento interno en suelos granulares no plásticos en función de la granulometría y la compacidad (*)			
Tipo de suelo	Ángulo de rozamiento interno en función de la densidad inicial (°)		
	Flojo	Medianamente denso	Denso
Limo no plástico	26 a 30	28 a 32	30 a 34
Arena uniforme fina a media	26 a 30	30 a 34	32 a 36
Arena bien graduada	30 a 34	34 a 40	38 a 46
Mezclas de arena y grava	32 a 36	36 a 42	40 a 48

Cuadro 2.2 (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

En el Cuadro 2.2 se muestran algunos órdenes de magnitud de los ángulos de rozamiento que cabe esperar en función de la compacidad y el tipo de suelo, en donde se pueden apreciar algunos de los aspectos descritos anteriormente.

2.1.3 Otros ensayos

El ensayo triaxial

Dispositivo de ensayo

El ensayo de laboratorio más difundido para el estudio de la resistencia al corte de los suelos es el triaxial. Aunque con algunas limitaciones, esta prueba resulta muy versátil y

permite obtener una buena y variada información sobre la resistencia del suelo en diversas condiciones controlables a voluntad.

El ensayo triaxial (Figura 2.5) consiste en preparar una probeta cilíndrica de suelo, de altura doble del diámetro, que se rodea de una membrana impermeable. Si se desea permitir el drenaje y controlar las presiones intersticiales en el interior de la muestra, se colocan además sendas piedras porosas en la base y en la parte superior de la probeta.

La probeta se instala a continuación en el pedestal metálico de una célula, también cilíndrica, dentro de la cual se introduce agua a la que se le puede dar presión (conducto y válvula e de la (Figura 2.5). Habida cuenta que dicha presión de cámara actúa con la misma intensidad en todas las direcciones, mediante la célula se puede aplicar una presión total isótropa sobre la muestra $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_c$.

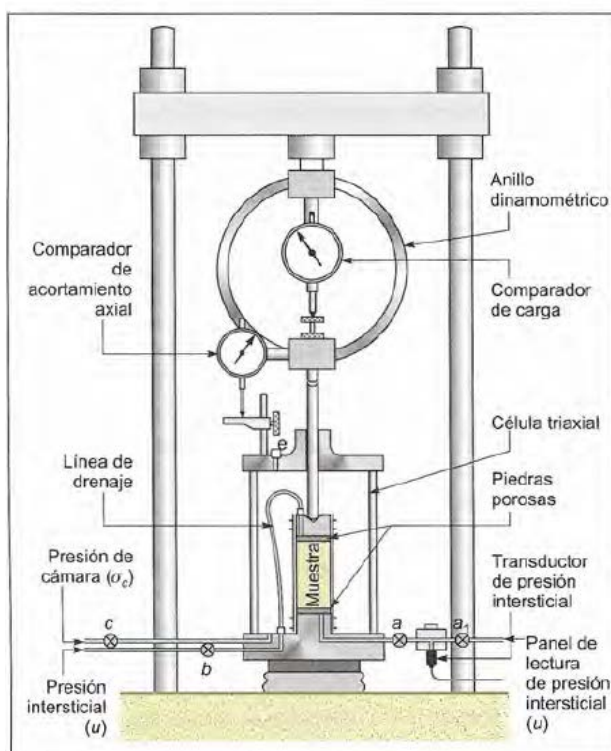


Figura 2.5 Esquema de un ensayo triaxial (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

En la parte superior de la probeta, conectado a ella a través de la piedra porosa, se dispone un tubo llamado «línea de drenaje». Este conducto permite aplicar al agua que rellena los poros del suelo la presión intersticial (u) deseada (conducto y válvula b). Al mismo tiempo, también permite controlar la salida y entrada de agua de la probeta. Así, si el suelo se encuentra saturado, la reducción o aumento de su volumen de huecos irá necesariamente asociado a la expulsión o ganancia del mismo volumen de agua, de manera que el sistema conectado a la válvula b, permite medir en todo momento los cambios de volumen del suelo durante ensayos con drenaje.

Por último, en el pedestal, bajo la probeta se dispone de un tercer conducto conectado directamente con la muestra de suelo a través de la piedra porosa inferior. Dicho conducto, conectado a un transductor de presión intersticial, permite medir en todo momento la presión intersticial en la muestra (conducto y válvula a).

El sistema de carga descrito sólo permite aplicar y controlar tensiones isotropas, ya sean totales o intersticiales. Para introducir tensiones tangenciales, al igual que en el ensayo de corte directo, lo que se hace es imponer un modo de deformación que implique la creación de tensiones de corte, que finalmente pueden medirse como una determinada reacción que se opone al movimiento.

En el caso del triaxial se imprime un movimiento ascendente controlado (a velocidad constante) a toda la célula. Para contrarrestar este movimiento, en la parte superior de la probeta se dispone de un pistón muy rígido, que sobresale de la célula y se encuentra unido a un anillo dinamométrico en donde se mide la reacción necesaria para mantener inmóvil la parte superior de la muestra ($\Delta\sigma_1$) En definitiva, en el ensayo triaxial se pueden controlar las tensiones principales totales, las presiones intersticiales y las tensiones efectivas.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_c + \Delta\sigma_1 ; & \sigma'_1 &= \sigma_1 = u \\ \sigma_2 &= \sigma_3 = \sigma ; & \sigma'_2 &= \sigma'_3 = \sigma_c - u \end{aligned}$$

Como puede apreciarse a partir de las expresiones anteriores:

- El sistema de carga aplicado no es completamente general, sino de simetría axial ($\sigma_2 = \sigma_3$).
- La tensión tangencial máxima en cada instante del ensayo viene dada por (véase la construcción del círculo de Mohr):

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Por último, se puede medir el acortamiento axial de la probeta de suelo de forma continua, para lo cual se emplea un comparador situado entre la célula y el pistón.

El ensayo de compresión simple

Este ensayo consiste en colocar una probeta de suelo cilíndrica o prismática en una prensa ordinaria y romperla a compresión, sin ningún confinamiento lateral, es decir con $\sigma_3 = 0$. Sólo puede llevarse a cabo sobre arcillas, limas o suelos

predominantemente cohesivos, dado que de otro modo, en ausencia de confinamiento lateral la probeta podría desmoronarse sola.

El ensayo es muy rápido, y aunque la probeta esté en contacto directo con el aire, por la rapidez con que se alcanza la rotura y por la impermeabilidad de los suelos ensayados con este procedimiento, se puede suponer que no se produce disipación de las presiones intersticiales generadas en el interior de la muestra.

En la (Figura 2.6) se muestra el círculo de Mohr en tensiones totales que se obtiene en un ensayo de este tipo. La tensión total menor σ_3 es nula, y la resistencia a la compresión simple (denominada habitualmente q_u), es el desviador de tensiones ($\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1 = q_u$).

El radio del círculo de Mohr será la resistencia al corte sin drenaje, Si' es decir, la mitad de la resistencia a la compresión simple, siempre que el suelo esté normalmente consolidado y saturado.

En este ensayo se mide el incremento de tensión total vertical $\Delta\sigma_1$ y la deformación axial ε_v , siendo habitual representar la curva tensión-deformación correspondiente. En función de la resistencia a la compresión simple las arcillas pueden clasificarse según el Cuadro 2.3.

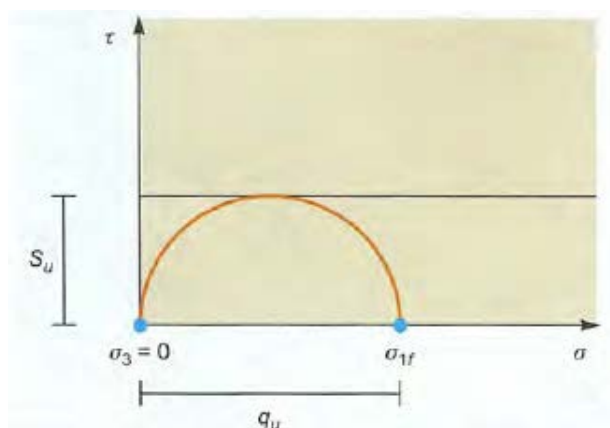


Figura 2.6 Círculo de Mohr en tensiones totales de un ensayo de resistencia a la compresión simple (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

Clasificación de las arcillas en función de su resistencia

Consistencia de la arcilla	Resistencia a la compresión simple (kPa)
Muy blanda	< 25
Blanda	25-50
Medianamente firme	50-100
Firme	100-200
Muy firme	200-400
Dura	> 400

Cuadro 2.3 (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

2.2 El ensayo de corte directo

El aparato de ensayo se representa esquemáticamente en la Figura 2.7. Se trata de una caja rígida de acero, usualmente de sección cuadrada, que se encuentra dividida en dos mitades y en cuyo interior se coloca la muestra de suelo. Encima de ésta se dispone una placa de reparto rígida sobre la que se puede aplicar una carga vertical (N). Todo el conjunto se introduce en un recipiente de acero de mayores dimensiones, que puede llenarse de agua para realizar el ensayo en condiciones de saturación (en este último caso se pueden disponer también piedras porosas encima y debajo de la muestra para facilitar el drenaje). La inducción de tensiones cortantes en el suelo se logra trasladando horizontalmente la parte inferior de la caja de corte mientras que se impide totalmente el movimiento de la zona superior. Una prueba completa sobre un determinado suelo consiste en ensayar tres muestras idénticas del mismo material bajo tres cargas verticales distintas (N_1, N_2, N_3) o, lo que es lo mismo, bajo tres tensiones normales diferentes (basta dividir cada carga (N) por la sección (S_0) de la muestra para obtener la tensión normal actuante). En cada uno de los ensayos individuales, a medida que se obliga a la parte inferior de la caja a desplazarse en horizontal a velocidad constante, se va midiendo:

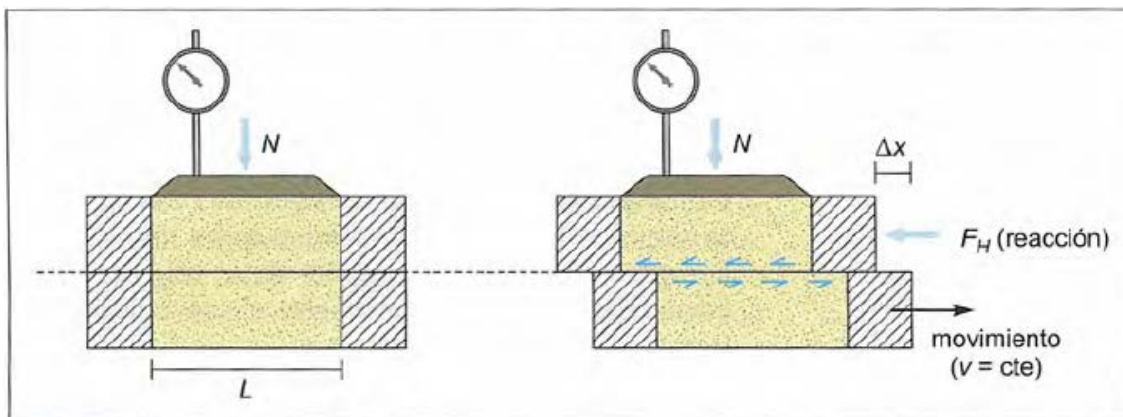


Figura 2.7 Esquema del aparato de corte directo (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

- 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:

- Se aplica una tensión total vertical N_1 .
- Si el ensayo se realiza con la muestra saturada y la célula inundada, habitualmente se deja consolidar la muestra hasta que se disipen los excesos de presión intersticial generados. Esta fase es similar a un escalón del ensayo

edométrico, de manera que se puede dibujar la curva asiento tiempo y comprobar cuándo finaliza la consolidación, momento en el que se puede suponer que la tensión total aplicada se ha transformado íntegramente en tensión efectiva.

- c) Se imprime a la parte inferior de la caja de corte una velocidad horizontal constante y se mide a intervalos de tiempo determinados la reacción (FHI) necesaria para impedir el desplazamiento de la superior, de manera que la tensión tangencial en cada instante resulta ser:

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

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

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

Este mismo proceso se vuelve a realizar con otras dos muestras idénticas de suelo, pero sometidas a tensiones normales crecientes, (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.

En la Figura 2.8 se muestran las tensiones tangenciales máximas de las curvas anteriores junto con las tensiones efectivas normales iniciales. Como puede apreciarse, los puntos representativos (σ'_n, τ_f) de los tres ensayos se pueden unir de forma bastante aproximada con una recta, que sería la línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura de la que se pueden fácilmente obtener los parámetros (c', ϕ') .

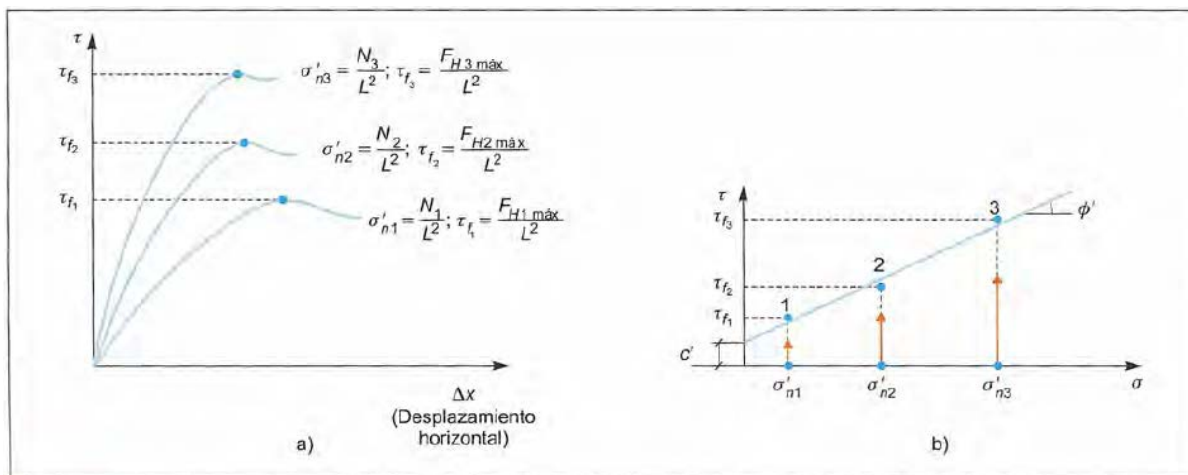


Figura 2.8 Obtención de la envolvente de rotura de los parámetros de resistencia al corte a partir de un ensayo de corte directo drenado (González de Vallejo, *Ingeniería Geológica*)

Ventajas e inconvenientes del ensayo de corte directo

El sencillo dispositivo de ensayo descrito cuenta con algunas ventajas, así como con una serie de limitaciones.

Las principales ventajas son:

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

En cuanto a las limitaciones cabe citar:

- La superficie de rotura es obligada.
- La distribución de tensiones en la superficie de corte no es uniforme.
- 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.
- 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 Norma UNE 103401

2.3.1 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 .

2.3.2 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 .

2.3.3 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.

2.3.4 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.

2.3.5 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 2.10 Relación tipo de suelo- desplazamiento de la caja (mm) UNE 103401

Se debe comprobar que todas las componentes horizontales están 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 cronometro. 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 a 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 %.

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

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

1. Teclado (Imagen 3.1).
2. Pantalla táctil (Imagen 3.1).
3. Puerto tarjeta SD (Imagen 3.2).
4. Puerto USB (lateral aparato).
5. Entrada web (lateral aparato).
6. 8 entradas para canales (Imagen 3.2).
7. Entrada para conectar monitores (Imagen 3.2).
8. Entrada de corriente (Imagen 3.2).
9. Interruptor de encendido (Imagen 3.2).



Imagen 3.1

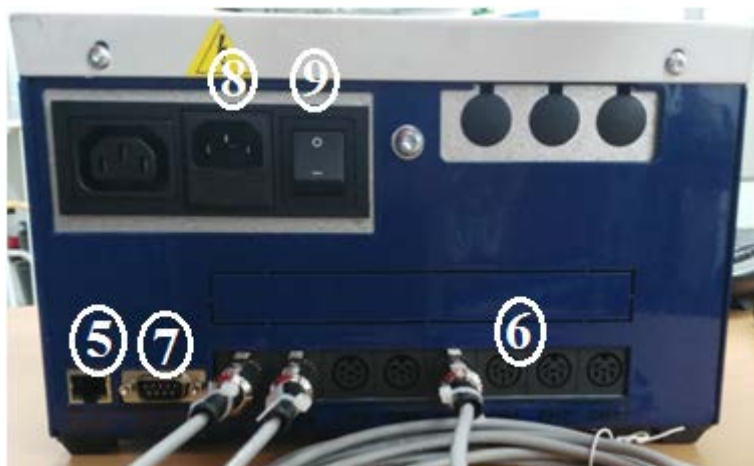


Imagen 3.2

El aparato no tiene memoria interna por lo que necesitaremos 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 3.3), aparecen las medidas que se están realizando en el momento actual.
- Visualización de las alarmas activadas (Imagen 3.3), muestra en la pantalla si se produce algún error.
- Archivo de ensayo (Imagen 3.3), aparecen los ensayos que hay guardados en la memoria externa.
- Configuración sistema (Imagen 3.4).
- Panel de control(Imagen 3.4), pulsando nos aparece otro submenú:
 - Fecha y hora.
 - Configuración internacional.
 - Calibración pantalla táctil.
 - Ahorro de energía (Imagen 3.5).
 - Conexión de red (Imagen 3.5).
 - Programa (Imagen 3.6).

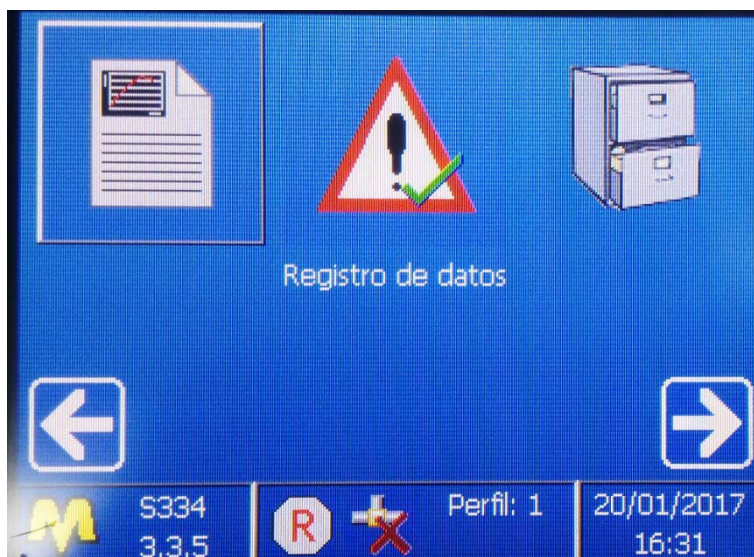


Imagen 3.3

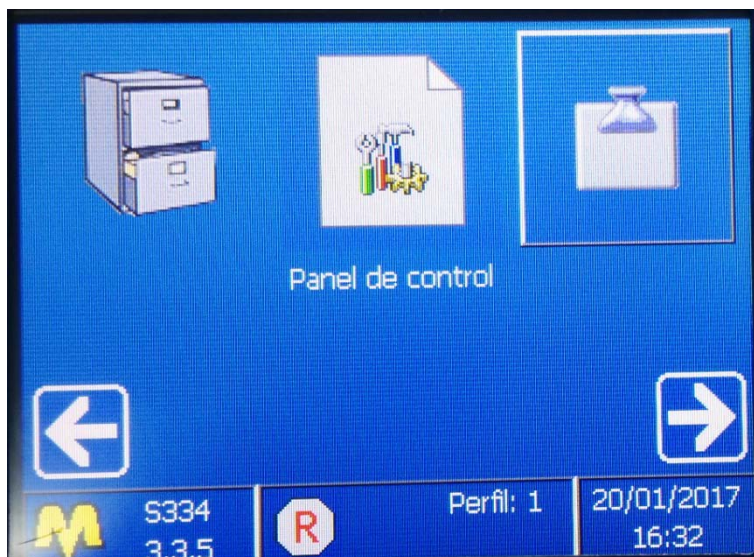


Imagen 3.4

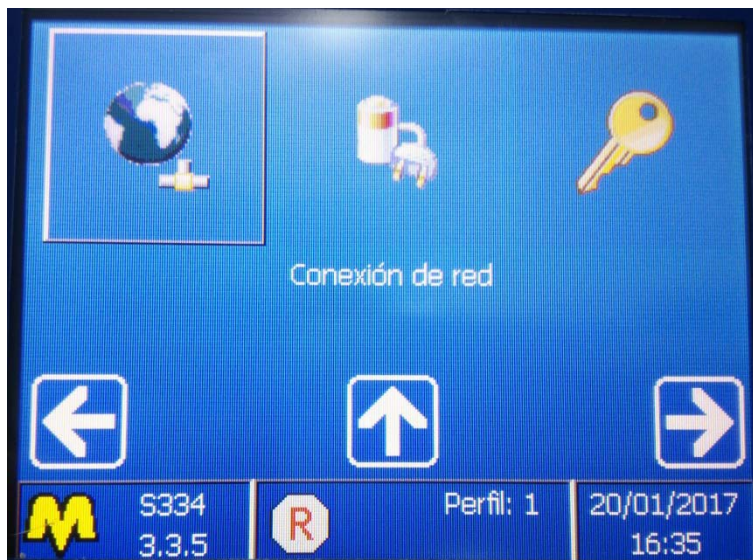


Imagen 3.5

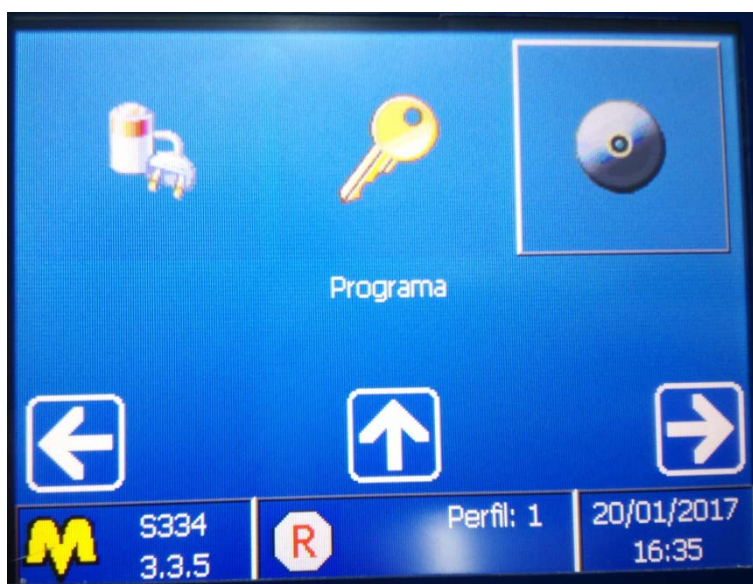


Imagen 3.6

3.1 Ajuste de instrumentación y calibración del aparato

Para poder usar Cyber-Plus evolution de forma correcta tiene que estar bien calibrado. Aunque viene calibrado de fábrica, los pasos que habría que seguir p en el caso de que no esté calibrado de forma correcta, serían los siguientes:

1. En el menú de inicio del aparato nos iríamos a “ Panel de control” (Imagen 3.7).



Imagen 3.7

2. Una vez seleccionado, elegiríamos la segunda opción que nos aparece en pantalla (Imagen 3.8), al elegirla aparece en pantalla los ocho canales de los que dispone el aparato, en este momento elegimos el que queremos calibrar.




Imagen 3.8

3. Al seleccionar el canal, nos aparecerá el siguiente menú (Imagen 3.9), rellenaremos los campos igual que aparecen en la imagen.



Imagen 3.9

4. Pulsando  llegamos a esta pantalla (Imagen 3.10) donde ponemos el número de decimales que queremos que se obtengan en el ensayo y la fecha donde se hizo la última calibración.

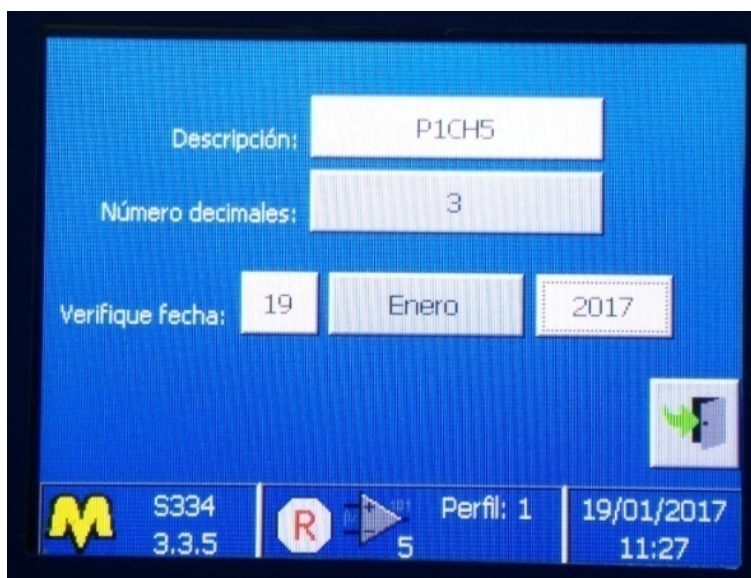




Imagen 3.10

5. Por último calibramos definitivamente el aparato introduciendo unos valores determinados (Tabla 4.1), en este caso estamos calibrando el canal 5 para la deformación horizontal.

(mm)	(Puntos)
0.000	110207
2.500	100213
5.000	88519
8.000	74408
12.000	55494
15.000	41376
18.000	27232
22.000	8442
23.000	3446

Tabla 3.1. Valores para la calibración del canal

6. Presionamos .

7. Para introducir los datos nos fijamos en la (Imagen 3.11) , primero tenemos que pulsar ,  esto nos permitirá ir añadiendo los puntos que necesitamos, por defecto aparecerán los que se ven en la imagen, para cambiarlos a nuestro gusto deberemos de pulsar en las dos ventanas inferiores izquierdas donde se parecía los datos seleccionados , si pulsamos uno de ellos nos aparecerá una ventana n (Imagen 3.12) para introducir los números que nosotros deseemos , una vez introducidos será repetir el proceso hasta que tengamos todos los datos deseados.

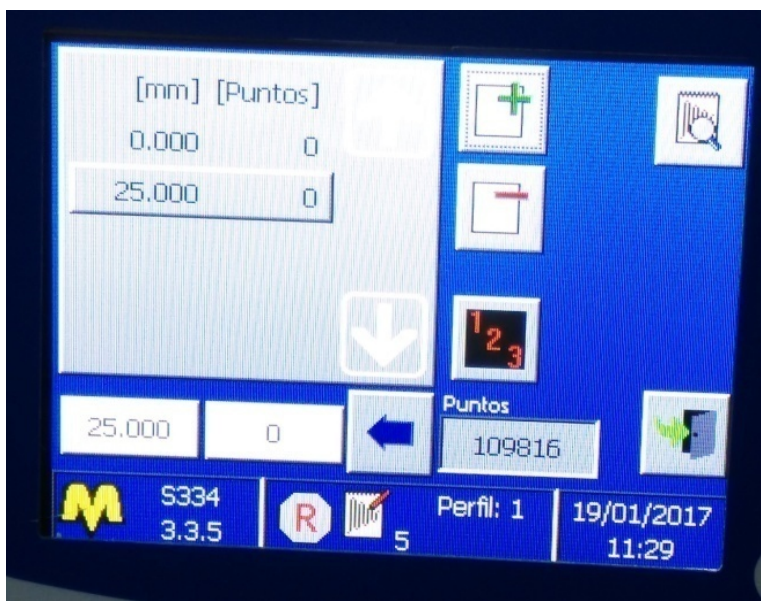


Imagen 3.11

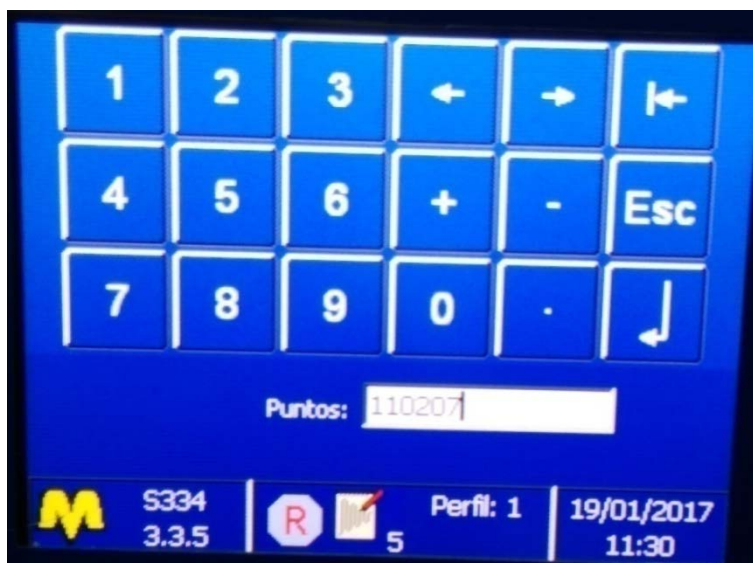



Imagen 3.12

8. Para que se queden registrados los cambios deberemos darle al icono que aparece en la parte inferior derecha de la pantalla .

4 Software para la realización de informes de resultados. ShearLab reports

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. Por defecto Cyber-Plus evolution nos da los datos en un .txt formado por cuatro columnas, la primera sería el tiempo en segundos, la segunda la carga en kN, la tercera el desplazamiento vertical en mm y la última sería el desplazamiento horizontal en mm (Imagen 4.1). Shearlab reports está configurado para recibir la información del .txt de la siguiente manera: tiempo, desplazamiento vertical, desplazamiento horizontal, carga. Por lo que si queremos que el programa funcione tenemos que cambiar el orden de las columnas para quedar acorde a lo que pide Shearlab (Imagen 4.2).

ENS-10KG 23-01-2017 17.53.31.txt: Bloc de notas				
Archivo Edición Formato Ver Ayuda				
[[GRAPH]]				
Hora [sec]	CH1: Carga [kN]	CH2: Desplazamiento [mm]	CH5: Desplazamiento [mm]	
0,000	0,000	0,000	0,000	
5,000	0,010	0,000	0,048	
10,000	0,015	-0,004	0,116	
15,000	0,017	-0,083	0,179	
20,000	0,035	-0,165	0,238	
25,000	0,048	-0,172	0,311	
30,000	0,054	-0,178	0,369	
35,000	0,058	-0,181	0,442	
40,000	0,062	-0,184	0,512	
45,000	0,065	-0,186	0,571	
50,000	0,068	-0,187	0,648	
55,000	0,070	-0,187	0,702	
60,000	0,073	-0,188	0,761	
65,000	0,073	-0,189	0,821	
70,000	0,074	-0,189	0,889	
75,000	0,077	-0,189	0,955	
80,000	0,078	-0,189	1,012	
85,000	0,079	-0,189	1,068	
90,000	0,081	-0,189	1,127	
95,000	0,081	-0,189	1,189	
100,000	0,082	-0,188	1,255	

Imagen 4.1 Datos Cyber-Plus evolution

ENS-10KG (corregido) 23-01-2017 17.53.31.txt: Bloc de notas				
Archivo Edición Formato Ver Ayuda				
[[GRAPH]]				
Hora [sec]	CH2: Desplazamiento [mm]	CH5: Desplazamiento [mm]	CH1: Carga [kN]	
0	0	0	0	
5	0	0,048	0,010008006	
10	-0,004	0,116	0,015029056	
15	-0,083	0,179	0,017050868	
20	-0,085	0,238	0,035139386	
25	-0,092	0,311	0,048250096	
30	-0,098	0,369	0,054334155	
35	-0,101	0,442	0,058430438	
40	-0,104	0,512	0,06253362	
45	-0,106	0,571	0,065624527	
50	-0,107	0,648	0,068742418	
55	-0,107	0,702	0,070828696	
60	-0,108	0,761	0,073937777	
65	-0,109	0,821	0,074012741	
70	-0,109	0,889	0,075112923	
75	-0,109	0,955	0,078245406	
80	-0,109	1,012	0,07933817	
85	-0,109	1,068	0,080431684	
90	-0,109	1,127	0,082550575	
95	-0,109	1,189	0,082637602	
100	-0,108	1,255	0,083751809	

Imagen 4.2 Datos corregidos

- 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 4.3).

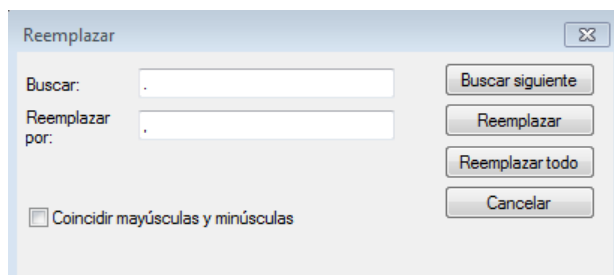


Imagen 4.3 reemplazar puntos por comas

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, en el apartado 2.3.6 de este trabajo viene explicado.
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 4.4).



Imagen 4.4 Menú Shearlab reports

5. Para introducir los datos tenemos que seleccionar “Manual input”, al seleccionarlo nos llevara el siguiente menú (Imagen 4.5).

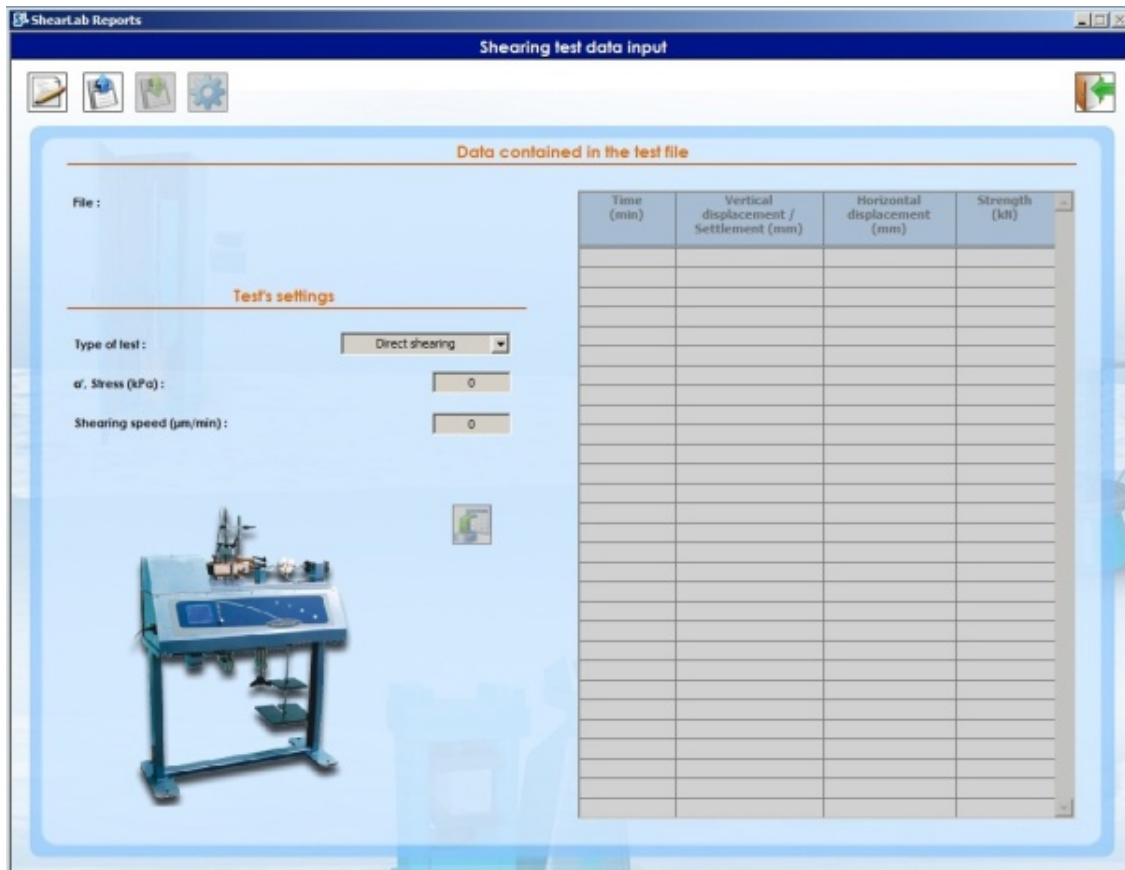


Imagen 4.5

6. Después crearemos un área de trabajo, para ello seleccionaremos “New test file”. Una vez creada nos aparecerá un menú para rellenar las características del ensayo con nuestros datos (Imagen 4.7).

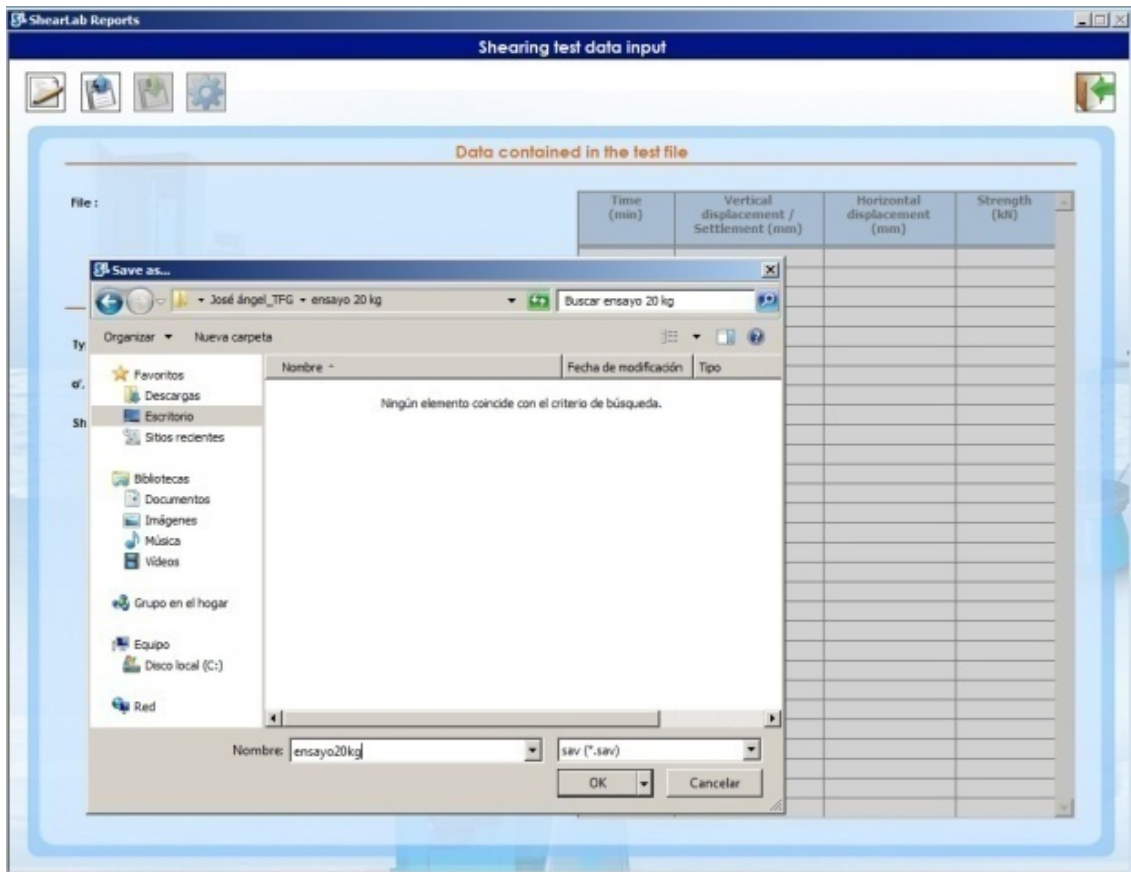


Imagen 4.6

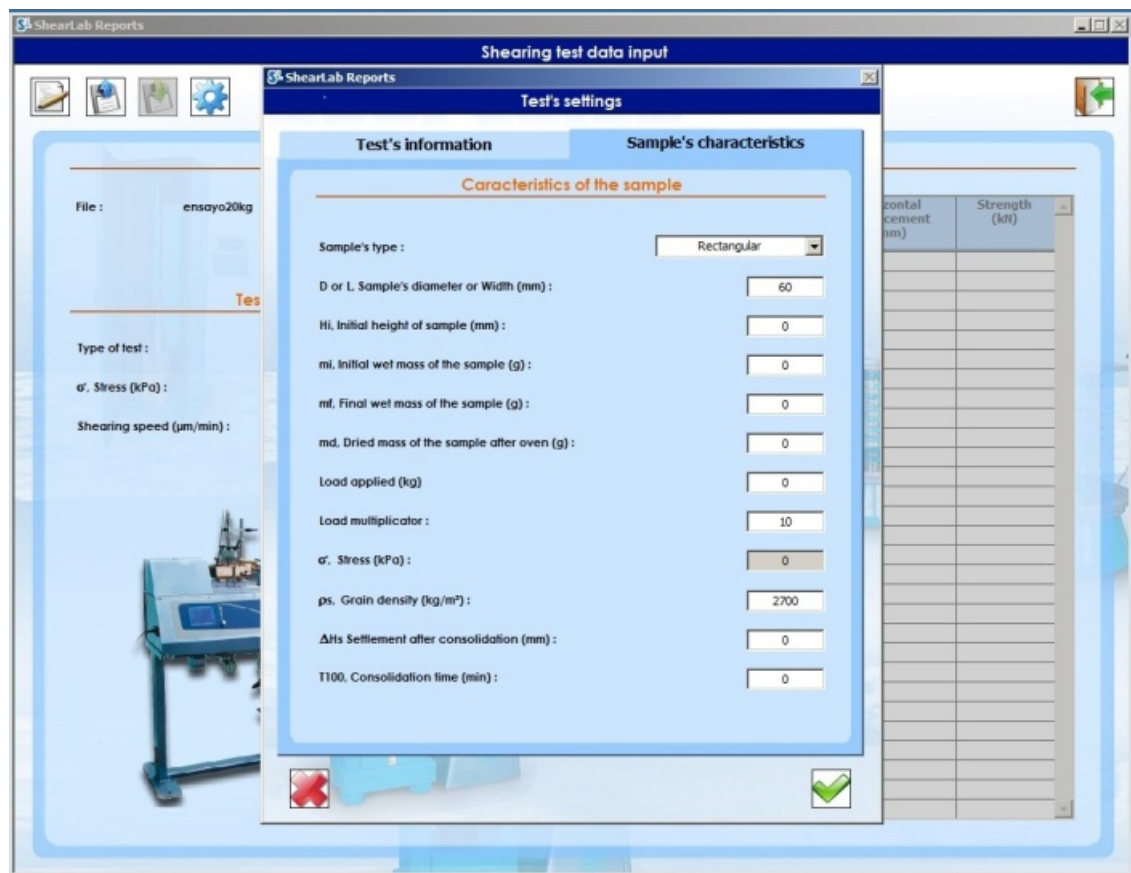


Imagen 4.7

7. A continuación pulsaremos en “Import data” (Imagen 4.8) y nos saldrá otra ventana, en esta pulsaremos en “load the data file” (Imagen 4.9) y cargaremos nuestro archivo .txt (Imagen 4.10), en esta ventana podemos cargar el número de ensayos que queramos.

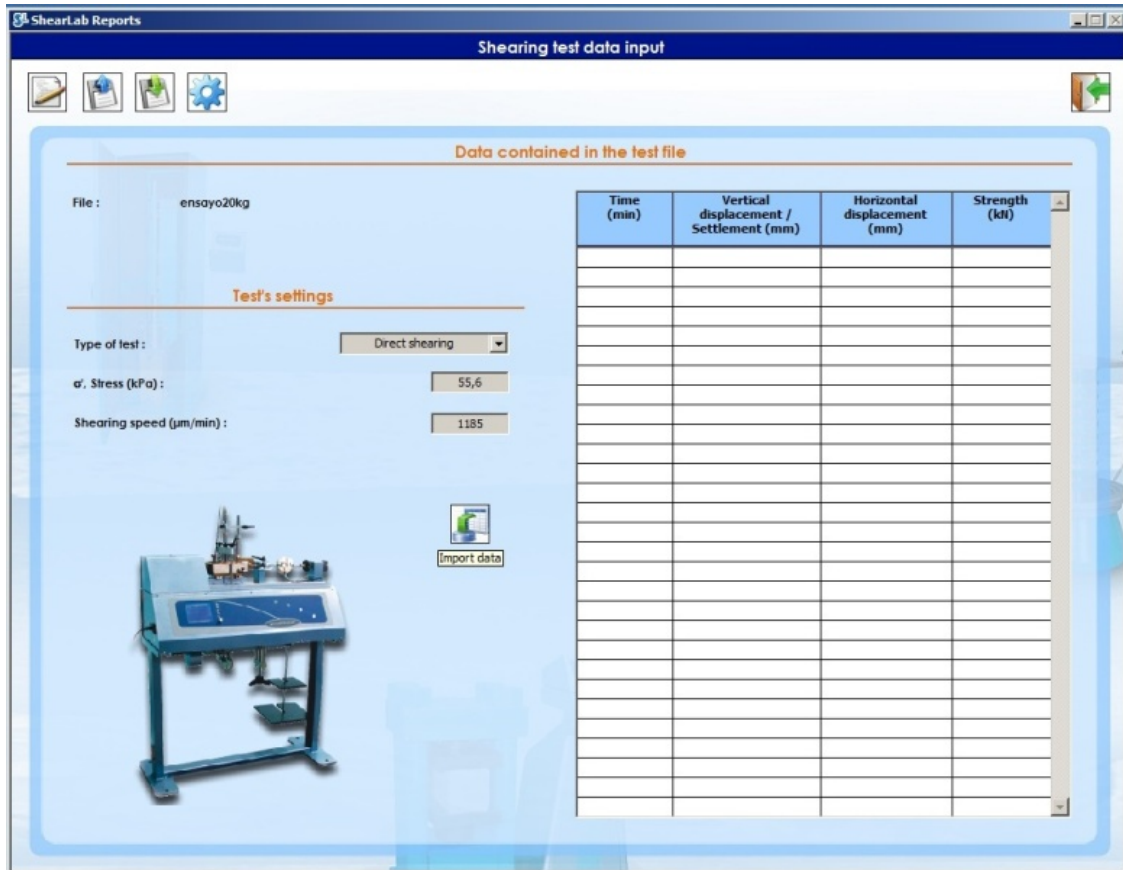


Imagen 4.8

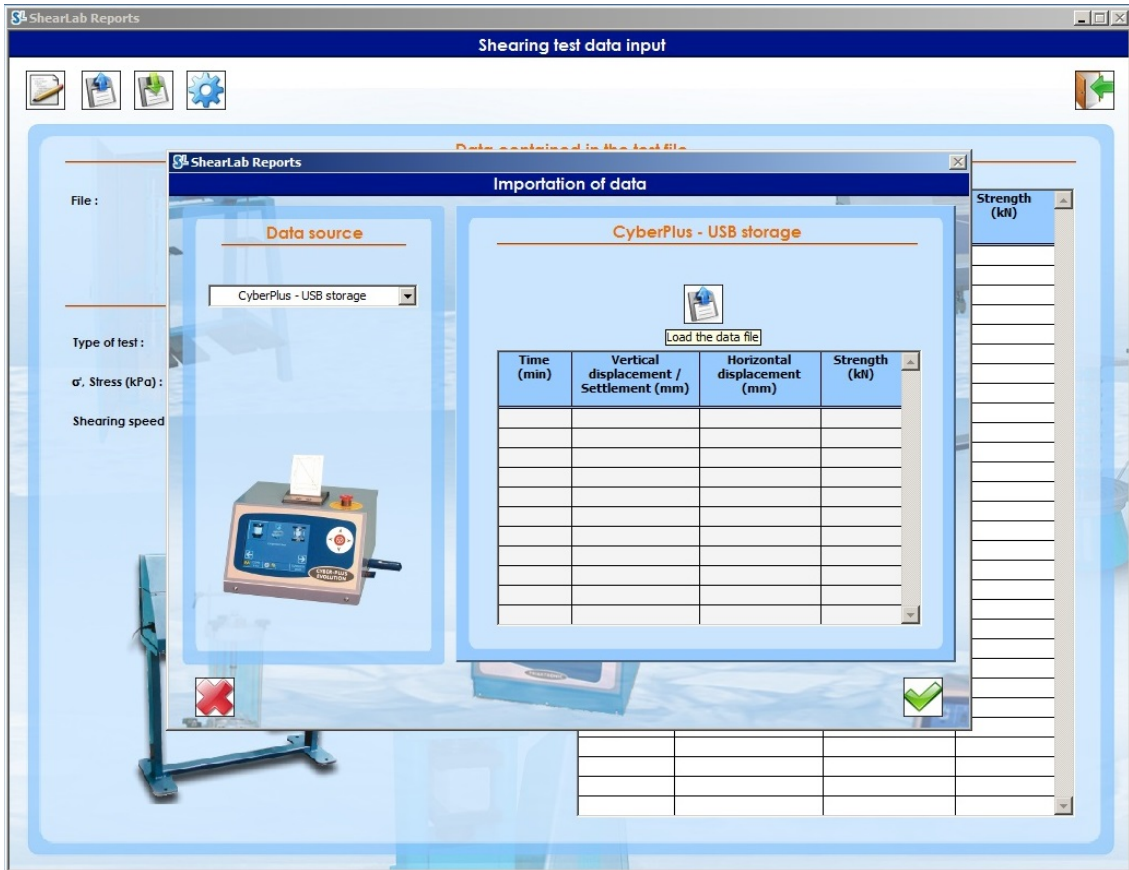


Imagen 4.9

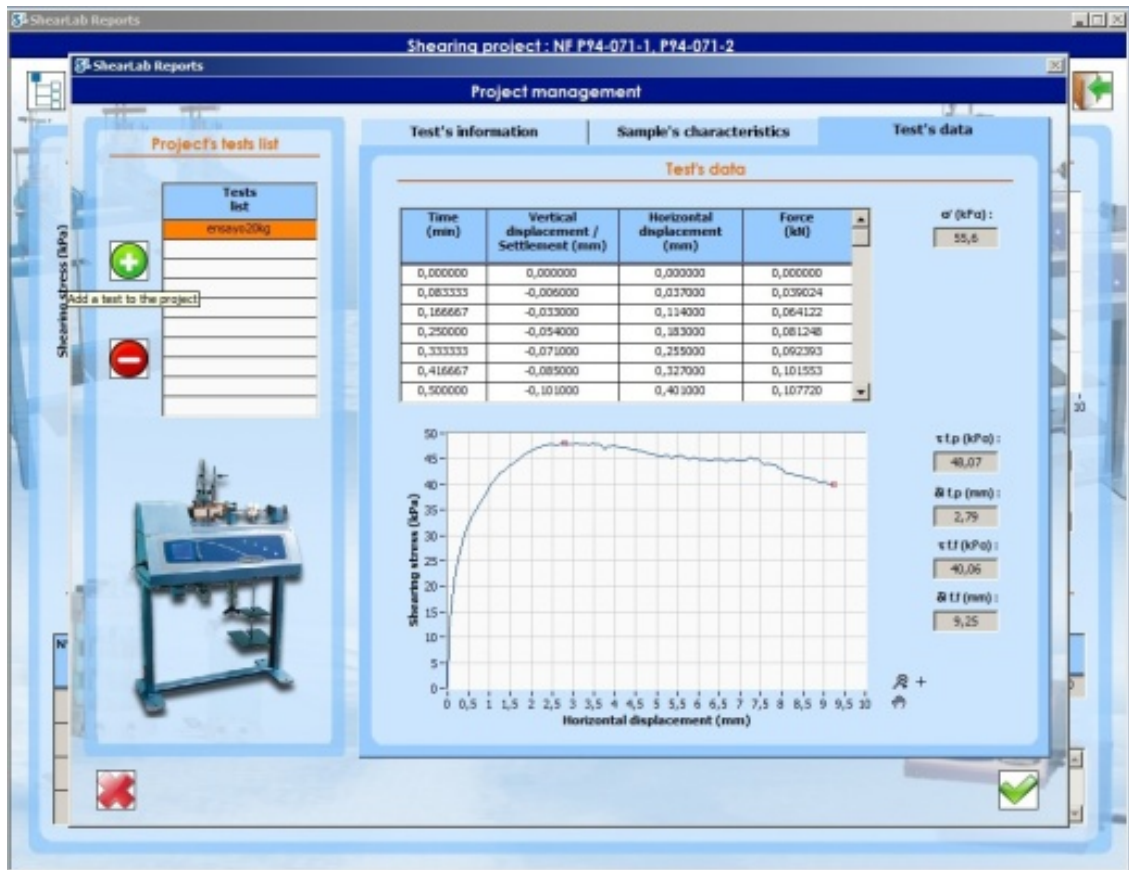


Imagen 4.1

8. Una vez seguidos todos estos pasos nos aparecerá una ventana final (Imagen 4.11) 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.

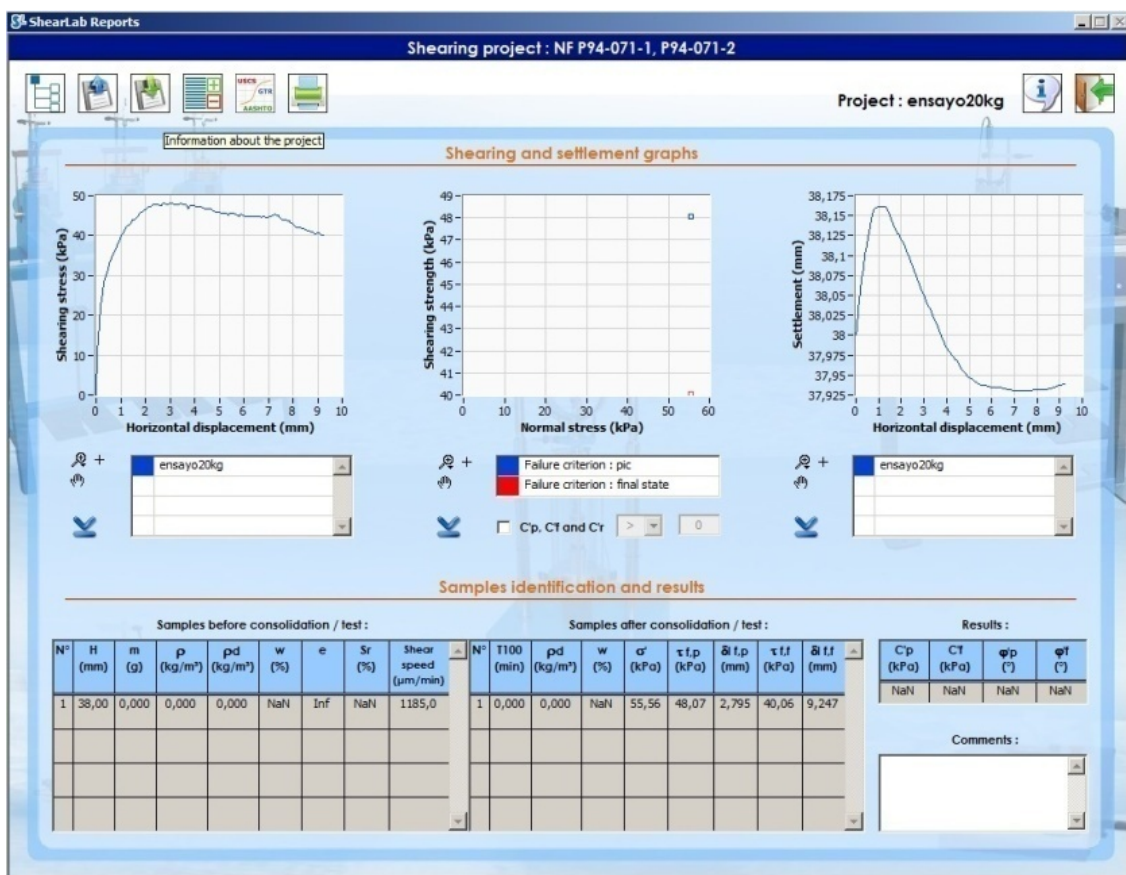


Imagen 4.11

9. Como resumen y para que el programa funcione hemos tenido que obtener los siguientes archivos (Imagen 4.12).

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 4.12

5 Puesta en marcha de la Máquina de corte directo

5.1 La máquina de corte directo

La maquina está formada por:

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



Imagen 5.1 Cuadro de maniobra aparato de corte directo

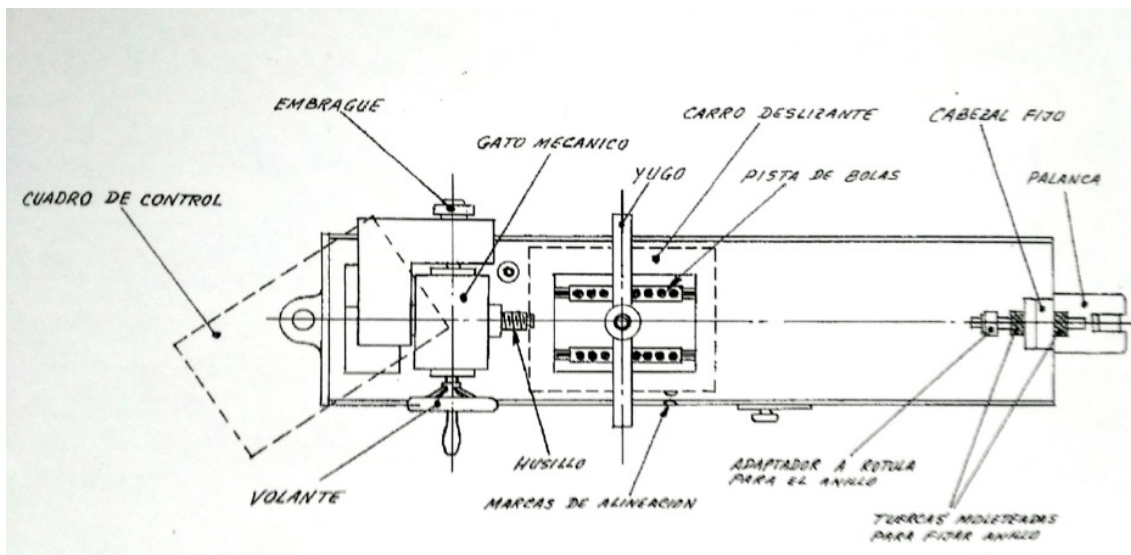


Imagen 5.2 Croquis aparato de corte directo

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

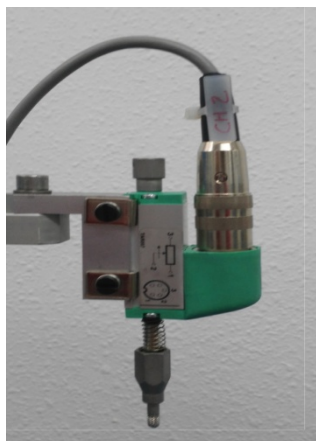


Imagen 5.3 transductor vertical

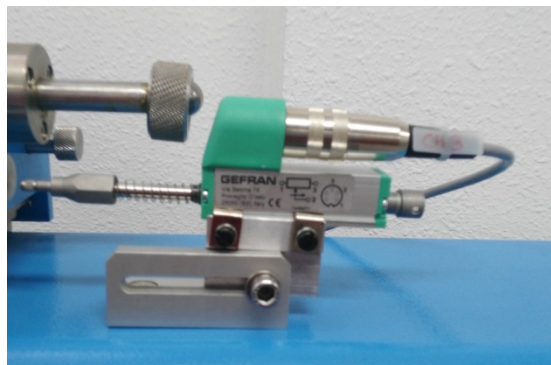


Imagen 5.4 transductor horizontal

- 1 carro deslizante para contener las células de corte de 60 x 60 mm, incluyendo un pistón repartidor de cargas verticales, cuatro parrillas, una placa base, dos placas porosas, dos tornillos con cabeza moleteada para fijar las dos mitades de la célula de corte y dos tornillos para separar las dos mitades de la célula.
- 1 célula de corte completa de 60 x 60 mm.
- Juego de pesas.

- Accesorios para remoldear muestras alteradas en célula de 60x60 mm.
- Accesorios para fabricar probetas remoldeadas en corte directo.
- Palanca con relación 10:1.



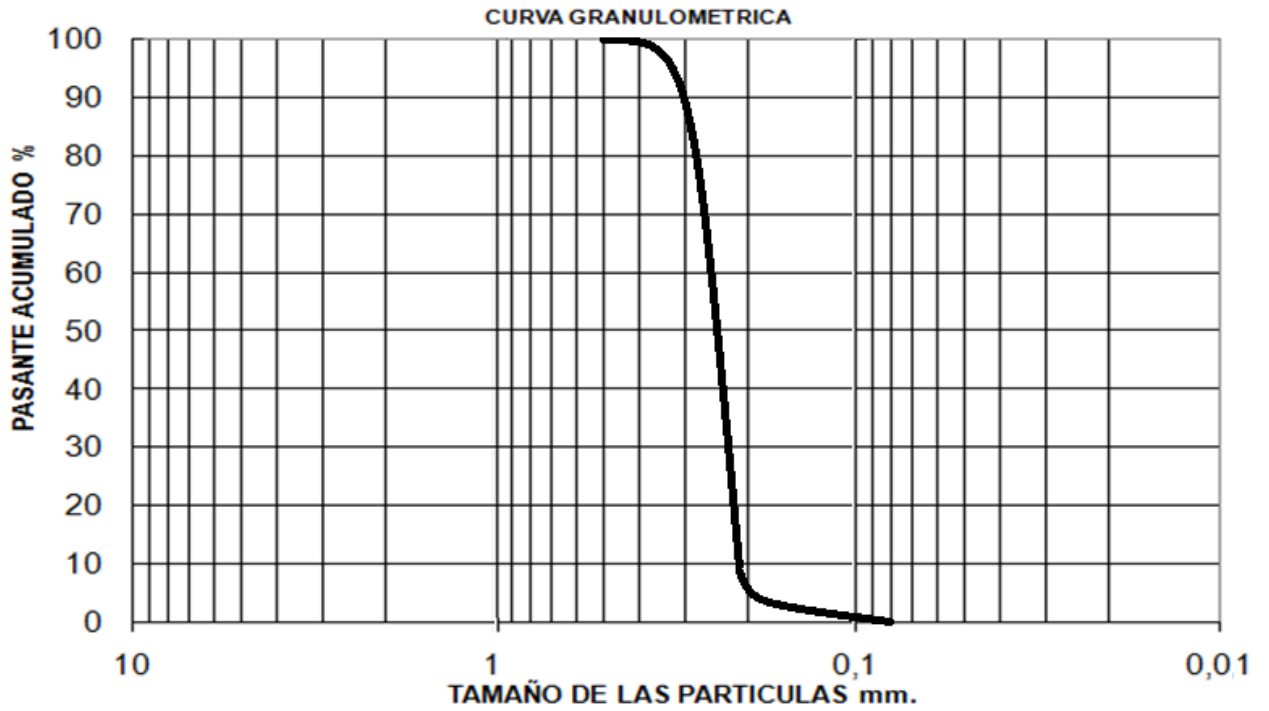
Imagen 5.5 Aparato de corte directo

6 Pruebas de laboratorio

6.1 Metodología de trabajo

6.1.1 Selección y preparación de la muestra.

En nuestro caso es una arena seca obtenida de La Manga – Mar Menor. Según la curva granulométrica (Gráfica 6.1, UNE 103101), 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 6.1 Curva granulométrica

1. 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.
2. Dejamos desecar la muestra y determinamos su masa con una precisión de 0.01g.
3. Cogemos la caja de corte con la placa base acanalada (Imagen 6.1).



Imagen 6.1

4. Colocamos encima de la placa acanalada una placa ranurada como muestra la (Imagen 6.2). Es importante que la dirección de las ranuras sea perpendicular a la dirección de corte.



Imagen 6.2

5. Rellenamos con nuestra arena hasta llenarla (Imagen 6.3), es importante que la arena caiga desde una altura pequeña, ya que sino esta se compactaría con la caída, para esto nos ayudamos de un embudo.

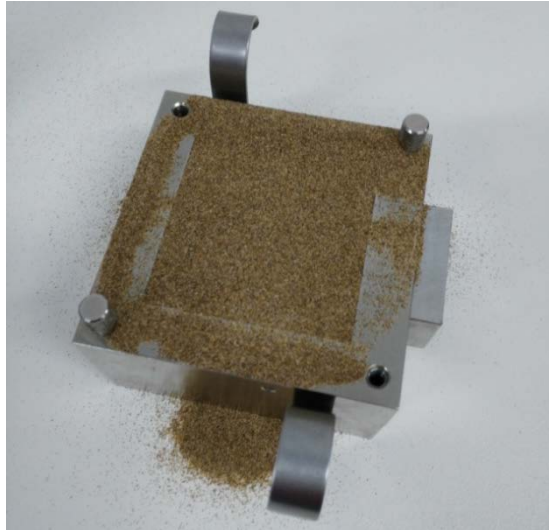


Imagen 6.3

6. Enrasamos la superficie de la caja de corte, retirando el material que sobra, para esto nos ayudaremos de una espátula para enrasar (Imagen 6.4).



Imagen 6.4

7. Colocamos la placa ranurada (igual que la colocada en el paso 4). Las ranuras tienen que estar en contacto con la arena (Imagen 6.5).

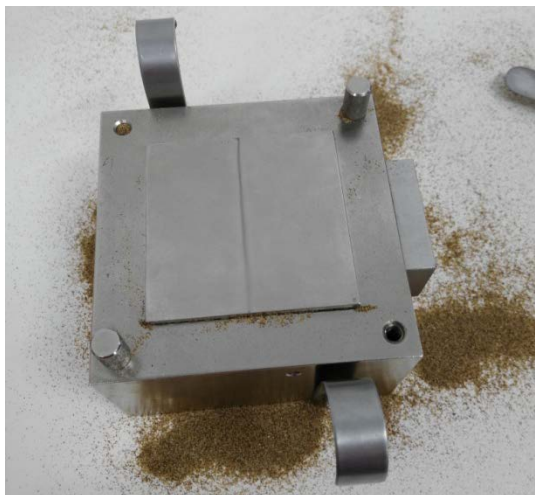


Imagen 6.5

6.1.2 Datos de propiedades índices de la muestra

En este apartado vamos a calcular los datos necesarios siguiendo el criterio de la Norma UNE 103401:

Parámetros	Resultados
Densidad aparente (ρ)	1.75 g/cm ³
Densidad seca inicial (ρ_d)	1.75 g/cm ³
Densidad aparente final (ρ_f)	1.9047 g/cm ³
Humedad inicial (w_i)	0%
Humedad final (w_f)	0%
Índice de huecos inicial (e_1)	0.52 adimensional
Índice de huecos final ϵ	0.40 adimensional
Grado de saturación inicial (S_i)	0 %

Tabla 6.1 Datos propiedades muestra

Otros datos:

- Densidad de las partículas (G_s) = 2.66 g/cm³.

Se han realizado tres ensayos con Picnómetros para obtener una $G_{s,media}$, siguiendo el procedimiento estipulado en la Norma UNE-103-302-94.

	Ensayo1	Ensayo2	Ensayo3
Masa Picnómetro	74,78	57,16	75,35
Masa Picnómetro + arena	80,7	64,44	84,7
Diferencia 1	5,92	7,28	9,35
Masa Picnómetro + arena+agua	174,85	157,44	177,33
Diferencia2 ,(Picnómetro + arena+agua)-masa arena	168,93	150,16	167,98
Masa Pictómetro + agua	171,09	152,78	171,18
Diferencia2-(Masa Pictómetro + agua)	2,16	2,62	3,2
MEDICIÓN MEDIA	2,66		

Imagen 6.6

- Máxima velocidad de desplazamiento horizontal (V_{max})= 0.875 mm/min

Para el cálculo de la velocidad, nos hemos fijado en la Norma UNE 103401 (Figura 2.10) y hemos elegido un tiempo de 10 minutos como recomienda la Norma.

6.1.3 Realización del ensayo

Para la realización del ensayo en el aparato de corte directo previamente hemos tenido que preparar la muestra cómo se explica en el apartado anterior. Una vez tenemos nuestra muestra como se puede observar en la (imagen 6.5) 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.
3. Colocamos el peso deseado para la realización del ensayo, para ello colocaremos las pesas en el soporte (Imagen 6.7). 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 6.7

4. Una vez realizados los pasos anteriores no 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 numero.

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

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



5. Encendemos Cyber-Plus evolution y una vez que estamos en el menú principal seleccionamos “Registro de datos” (Imagen 6.8), al seleccionarlo nos aparecerá una pantalla con unos valores (Imagen 6.9), estos valores son las mediciones que proporcionan los transductores.



Imagen 6.8



Imagen 6.9

6. Pulsando en el icono  entraremos en el submenú para programar el registro de datos (Imagen 6.10). En este submenú pondremos la descripción de nuestro ensayo, el dispositivo de almacenamiento Si pulsamos  aparecerá la siguiente pantalla (Imagen 6.11).
7. En esta imagen tenemos que elegir entre varias opciones para nuestros canales (Imagen 6.12) :
 - Archivo: Cyber plus recogerá los datos de los transductores.

- Grafica: mostrará la grafica de los datos de los transductores.
- Ambos: recopilara los datos de los transductores y muestra las graficas.

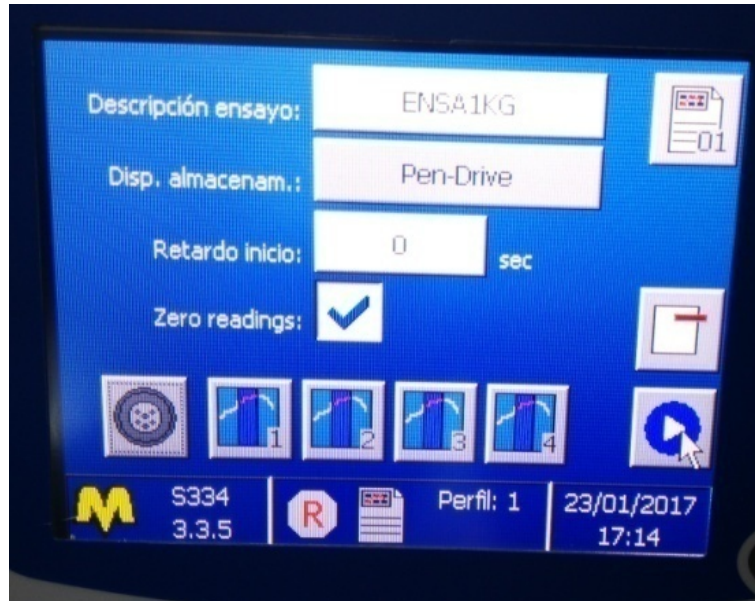


Imagen 6.10

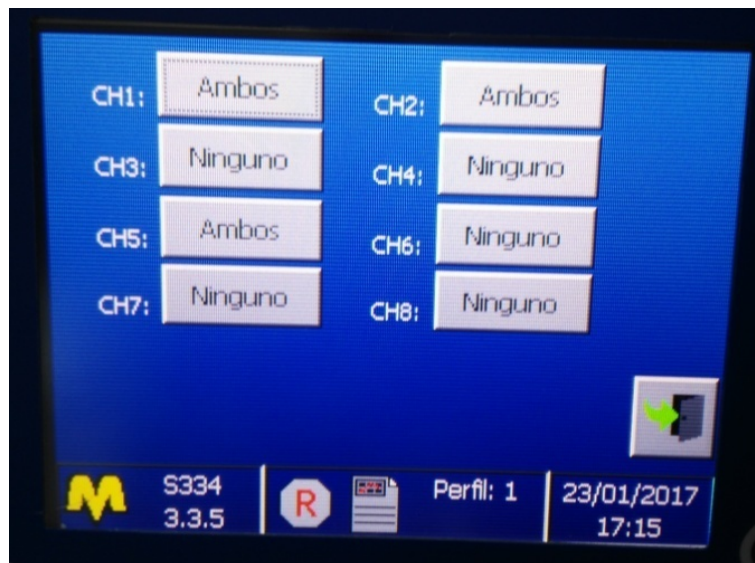


Imagen 6.11

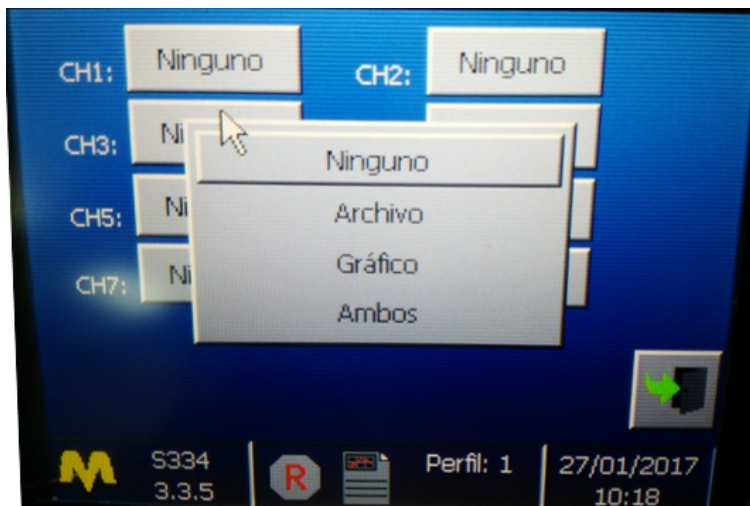



Imagen 6.12

8. Hecho esto y volviendo a la pantalla anterior (Imagen 6.10), pulsando , entraremos en otro submenú (Imagen 6.13) 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.

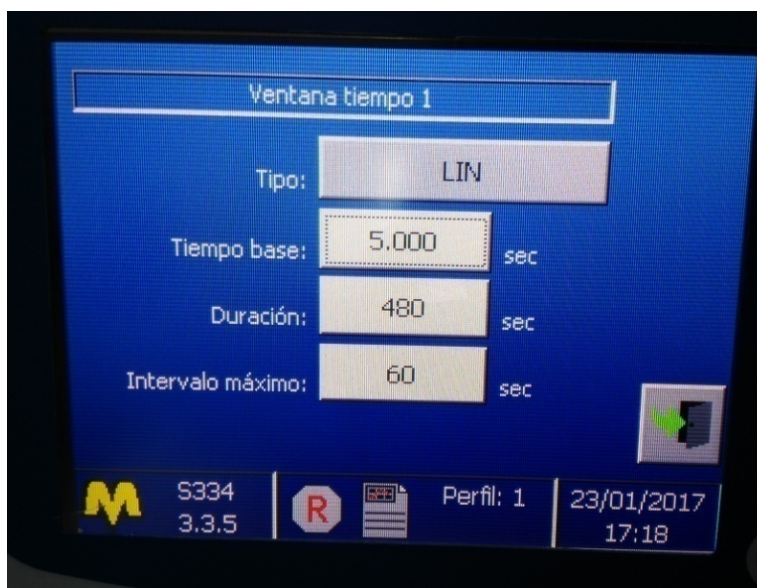




Imagen 6.13

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

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



10. Comenzado el ensayo y pulsando  nos aparecerá la grafica de los datos que los trasductores y el dinamómetro están recogiendo (Imagen 6.14), para poder desplazarnos entre las diferentes graficas pulsaremos  .



Imagen 6.14

11. Si queremos para en algún momento el ensayo solo tendremos que darle a “STOP”.
12. Con el ensayo ya terminado pasamos los datos a Shearlab y obtenemos un archivo que recoge toda la información del ensayo realizado (Imagen 6.15).

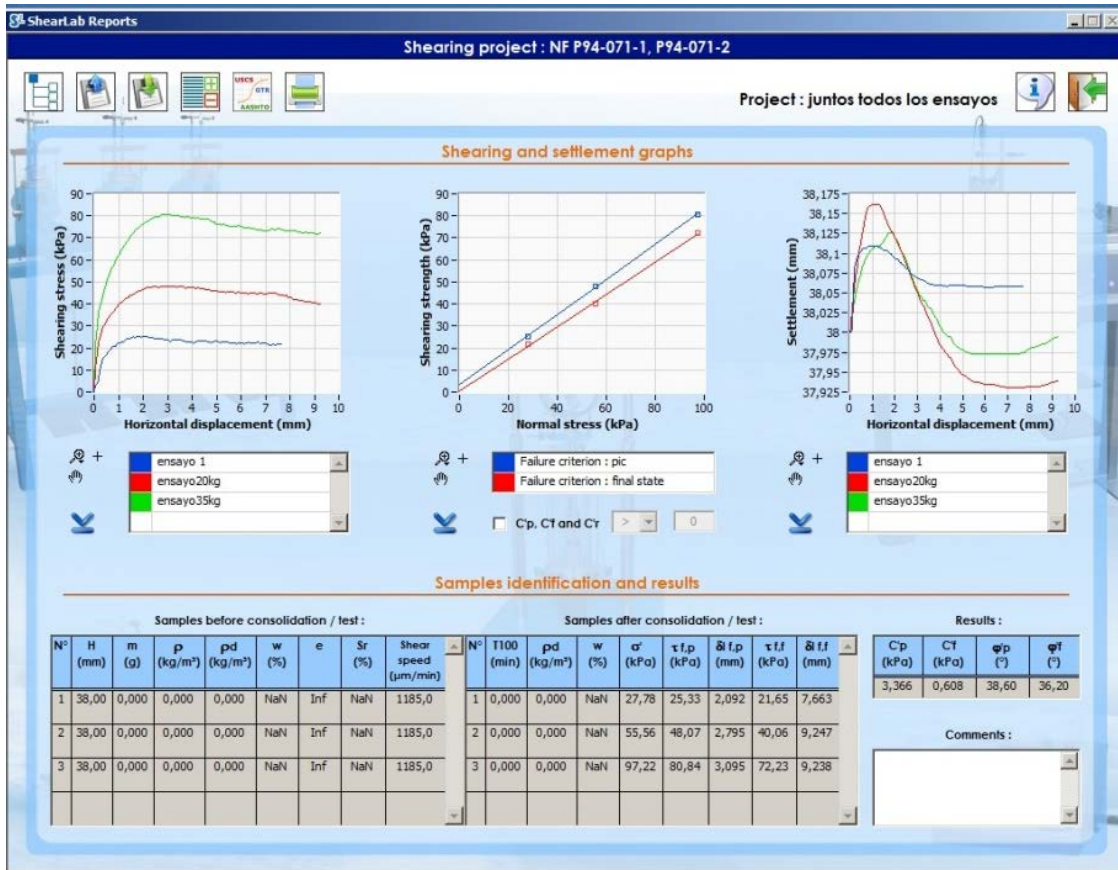
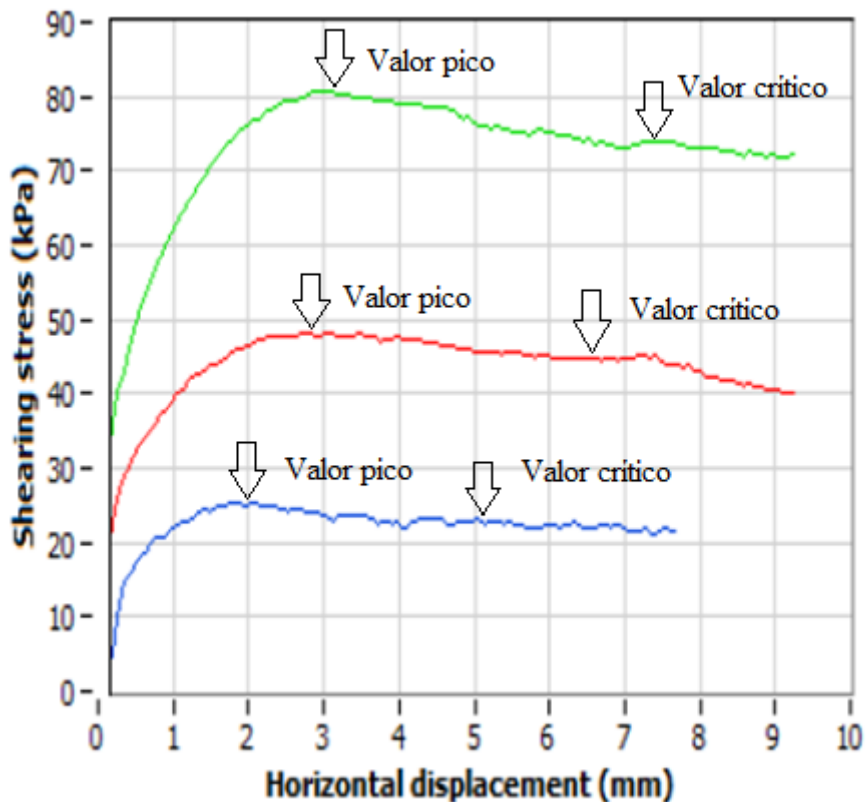


Imagen 6.15

6.2 Discusión de resultados

Se han realizado tres ensayos con la muestra: el primer ensayo con carga de 10 kg, el segundo ensayo con carga de 20 kg y el tercer ensayo con carga de 35 kg. Los resultados son los siguientes:

- Grafica tensión desplazamiento (Gráfica 6.2)



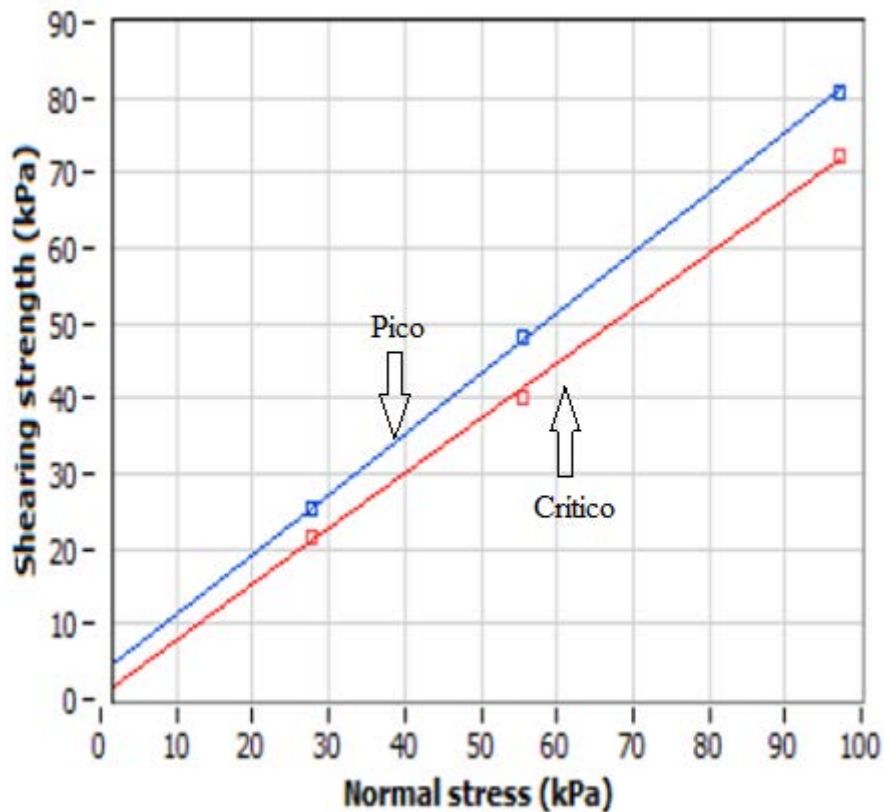
Gráfica 6.2

Como podemos observar a mayor tensión normal, mayor valor de resistencia pico. En cada uno de los tres ensayos hemos obtenido un valor pico y un valor critico.

En una arena suelta ideal la tensión tangencial movilizada aumentaría con el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un máximo (valor pico) y a partir de ese instante se mantendría constante aunque el desplazamiento horizontal siguiera. Por lo que el valor pico y critico coincidirían. En nuestro caso no coinciden debido a una leve compactación de la arena, probablemente causada durante la preparación de la muestra. Por ello al seguir el desplazamiento horizontal, la tensión tangencial movilizada decrece hasta que se estabiliza (punto crítico).

Nota: en la gráfica la línea azul corresponde al ensayo de 10 kg de carga, la línea roja al ensayo de 20 kg de carga y la línea verde al ensayo de 35 kg de carga.

- Gráfica envolvente de Mohr (Gráfica 6.3)

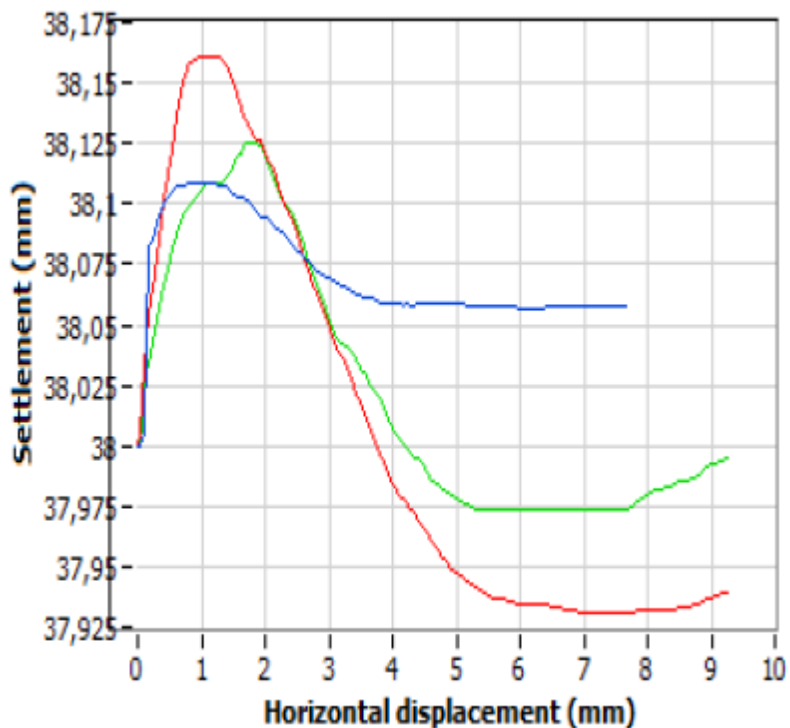


Gráfica 6.3

En esta gráfica se puede observar que se ha obtenido dos envolventes de Mohr: una con los valores pico y otra con los valores críticos. Se puede apreciar que la envolvente con los valores críticos no da cohesión, y que para los valores pico esta cohesión es despreciable.

Estos resultados son los esperables de acuerdo a la teoría, con valores de cohesión nulos o despreciables.

- Gráfica asentamiento de la muestra (Gráfica 6.4).



Gráfica 6.4

La gráfica corrobora que se trata de una arena suelta, que compacta y luego dilata, debido a un fenómeno conocido como 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 las otras provocando una expansión de la muestra y alcanzándose la resistencia máxima, que tiene lugar a relación de vacíos constante.

La deformación máxima alcanzada durante los ensayos ha sido de

- ensayo 10kg (línea azul), con un rango de 0.109 mm.,
- ensayo 20 kg (línea roja), con un rango de 0.16 mm. y
- ensayo 35 kg (línea verde), con un rango de 0.125 mm.

7 Conclusiones y comentarios finales

El objetivo principal del presente trabajo se ha llevado a término mediante la puesta en funcionamiento el equipo de corte directo y las nuevas herramientas adquiridas para el registro e interpretación de las deformaciones y tensiones durante la ejecución del ensayo.

Se ha elaborado una guía de uso del módulo de adquisición de datos CYBER-PLUS EVOLUTION y el software para la interpretación de los mismos ShearLab Reports, descrita en los apartados 3 y 4 de la memoria. Además, se ha preparado una hoja Excel que permite el tratamiento de las tensiones aportadas por el módulo de adquisición de datos, de manera que se pueda corregir la disminución progresiva del área del plano de rotura durante la ejecución del ensayo.

Se ha realizado un ensayo de corte sobre arena suelta, obteniéndose unos parámetros resistentes de cohesión crítica $c_c= 0$ kPa y ángulo de rozamiento interno crítico $\phi_c= 36^\circ$. Debido a la ligera compactación de la arena durante el procedimiento de preparación de la muestra, los ensayos arrojan también unos valores de cohesión pico $c_p= 3$ kPa y ángulo de rozamiento interno pico $\phi_p= 38^\circ$. Los resultados del ensayo se han presentado utilizando el Software ShearLab Reports.

8 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.

9 Anexos

- Informe del ensayo presentado por el programa Shearlab.

