

Interpretación de los resultados del ensayo de corte directo en arcillas consolidadas.

Alumno: Jorge Serrano Méndez
Director: IVAN ALHAMA MANTECA
Codirector: GONZALO GARCÍA ROS

Agradecimientos

Agradecer a mi familia por el apoyo incondicional que me han prestado durante todos estos años en la universidad.

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 en la puesta a punto de los aparatos y a Alberto Alcolea y Vicente Muñoz del SAIT de la UPCT por los análisis de las arcillas.

Índice

1	Introducción	1
2	Fundamentos teóricos	2
2.1	Modalidades de ensayo que se contemplan	2
2.2	Aparato de corte directo	3
2.3	Procedimientos operatorios	10
2.3.1	Ensayo consolidado – no drenado (CU)	10
2.3.2	Ensayo consolidado – drenado (CD)	18
2.3.3	Ensayo no consolidado – no drenado (UU)	19
2.3.4	Ensayo con varias pasadas. Resistencia residual	20
2.4	Puesta en marcha del ensayo de corte directo	22
2.4.1	Operaciones y medidas iniciales	22
2.4.2	Preparación y montaje de las probetas para el ensayo	22
2.4.3	Suelo cohesivo remoldeado	24
2.4.4	Preparación y montaje de las probetas para el ensayo	26
2.5	Obtención y representación de los resultados	27
2.5.1	Datos generales	27
2.5.2	Tensiones y desplazamientos	32
2.5.3	Representaciones gráficas	35
3	Pruebas de laboratorio	36
3.1	Selección de muestras	36
3.2	Ensayos	42
3.2.1	Ensayo consolidado – no drenado (CU)	42
3.2.2	Ensayo consolidado – drenado (CD)	53
3.3	Discusión de resultados	63
4	Conclusiones	69
5	Anexos	70
6	Bibliografía	75

1 Introducción

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 realización de dos tipos de ensayo de corte directo contemplados en la norma para arcillas consolidadas, cuyos resultados permitirán obtener los parámetros resistentes de la misma. Para alcanzar este objetivo se aprenderá a manejar la mesa de corte, los deformímetros piezoeléctricos para la obtención de las deformaciones verticales y horizontales, el 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.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Modalidades de ensayo que se contemplan

Para determinar los parámetros resistentes, cohesión, c , y ángulo de rozamiento interno, ϕ , se utiliza un equipo de corte directo, en donde una probeta (obtenida de la muestra de suelo) de forma cilíndrica o prismática cuadrangular que se encuentra restringida lateralmente por las paredes rígidas de una caja, se corta por un plano horizontal mientras se encuentra sometida a una presión normal a dicho plano. En este trabajo la probeta utilizada será de forma prismática rectangular.

Se pueden efectuar los siguientes tipos de ensayos:

- **Ensayo consolidado-drenado(CD).** Se aplica la presión normal, permitiendo el drenaje del suelo hasta finalizar la consolidación primaria. A continuación, se procede a la rotura de la probeta a una velocidad lo suficientemente 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 granulares). 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 procede a la rotura de la probeta 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_{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 .

En este trabajo se han realizado los dos primeros ensayos, el consolidado – drenado (CD) a una velocidad de 0,003494549 mm/min, la cual es una velocidad suficientemente lenta para que no se produzcan presiones intersticiales y un ensayo

consolidado - no drenado (CU), donde la velocidad elegida ha sido de 1 mm/min, velocidad que hará que no se pueda producir drenaje al ser bastante rápida, en la Figura 2.1 se muestra la velocidad de 1 mm/min que se utilizó en el ensayo de consolidado – no drenado (CU). En el anexo 1 se explica la obtención de ambas velocidades.



Figura 2.1. Velocidad para el ensayo consolidado – no drenado (CU).

2.2 Aparato de corte directo

El aparato de corte directo consta de las siguientes partes esenciales:

- **Cajas de corte directo.** Las cajas más usuales de corte directo permiten ensayar probetas en forma de prisma cuadrangular de 60 mm de lado, o bien cilíndricas de 50 mm de diámetro, y con una altura de unos 25 mm. En la Figura 2.2 se muestra la caja de corte utilizada en este trabajo.

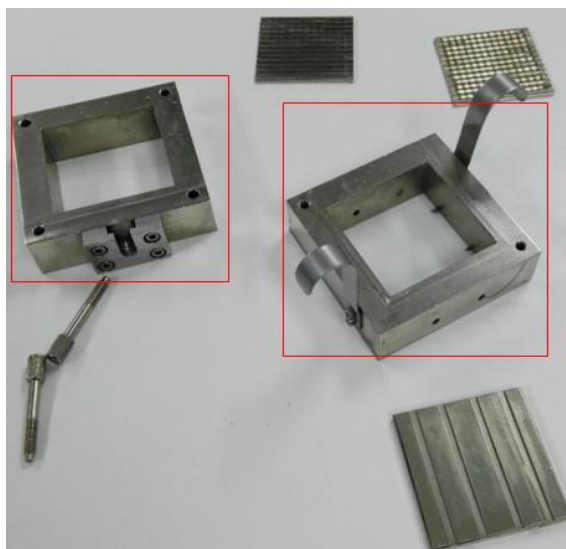


Figura 2.2. Caja de corte utilizada en este trabajo.

La caja de corte está dividida horizontalmente en dos mitades. La superior lleva solidario un dispositivo en forma de yugo, denominado “cuello de cisne”. Dicha forma resulta adecuada para asegurar que el esfuerzo horizontal se ejerce en el mismo plano que el de corte inducido en la probeta. Este dispositivo debe incluir una pieza de bloqueo, para unirle rígidamente al vástago del sistema de aplicación del esfuerzo horizontal, a fin de poder desplazar en ambos sentidos la mitad superior de la caja de corte. La mitad inferior termina en una placa basa acanalada desmontable, que se apoya en unas muescas fijadas a la caja. Debe ser lo suficientemente rígida para resistir cualquier deformación con la máxima carga.

Las caras en contacto de ambas mitades deben disponer de un rebaje, de manera que se asegure que la superficie de fricción se reduce al mínimo.

La caja debe incluir dos tornillos pasadores para fijar las dos mitades, y dos tornillos separadores que permiten la separación de las dos mitades antes de la fase de rotura. Además, la mitad inferior suele llevar como se puede ver en la Figura 2.3 un par de asas para facilitar su manipulación.

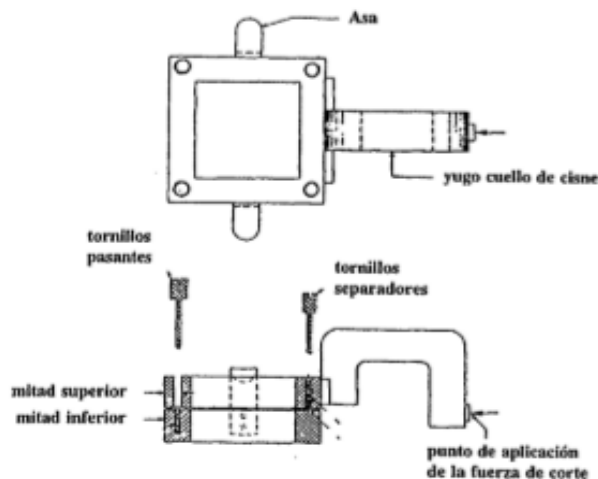


Figura 2.3. Detalles de la caja de corte (Norma UNE 103401).

La caja de corte se sitúa en el interior de un carro deslizante, en el cual la parte inferior de aquella queda rígidamente bloqueada. Estos detalles se pueden observar en la Figura 2.4.

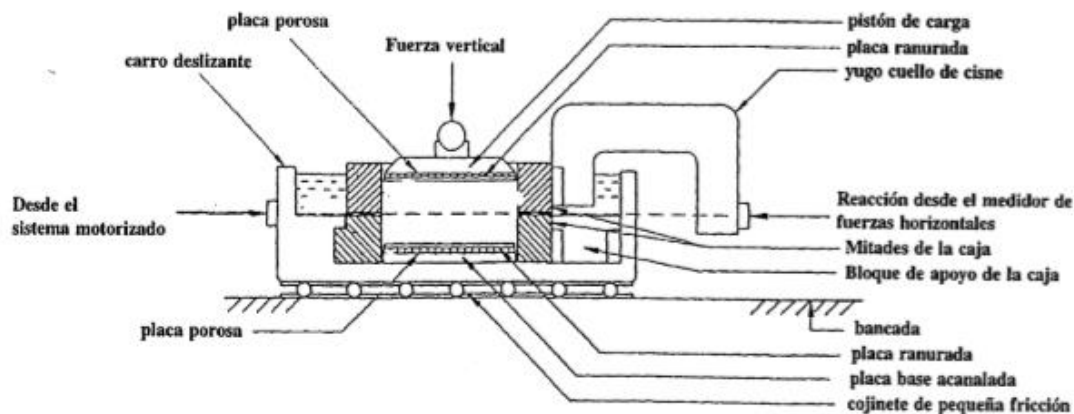


Figura 2.4. Disposición general de la caja y carro deslizable (Norma UNE 103401).

- **Carro deslizable.** En él se sitúa la caja de corte y permite sumergir en agua la probeta de suelo durante el ensayo. El carro va colocado sobre unos cojinetes de baja fricción que permiten el movimiento en dirección longitudinal. En la Figura 2.5. se muestra el carro deslizable de la máquina de corte utilizada para los ensayos.

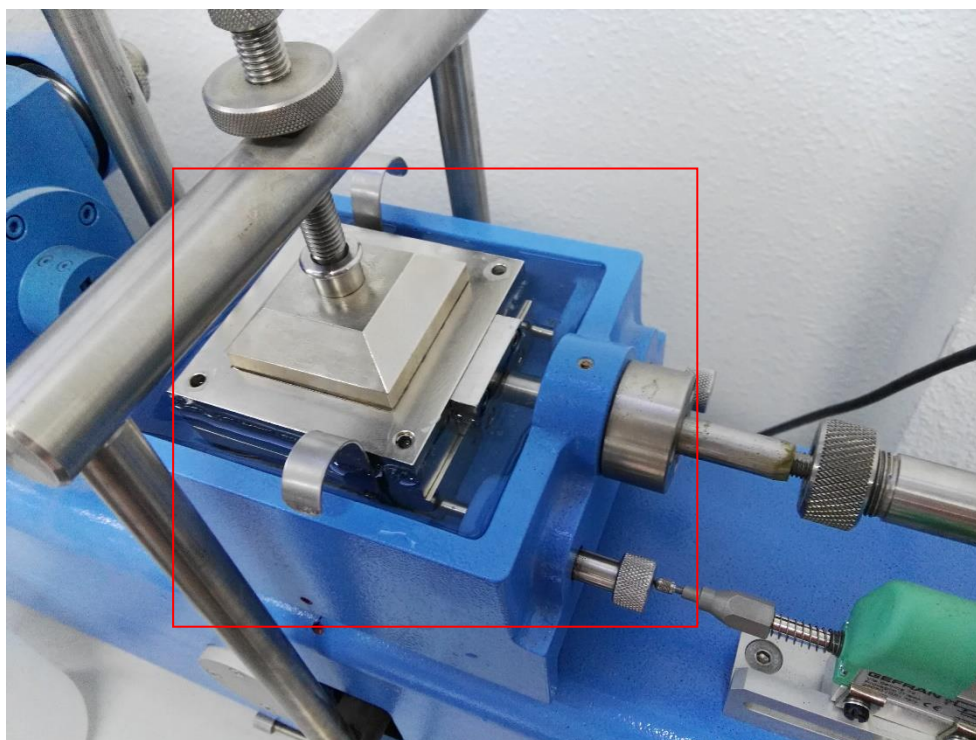


Figura 2.5. Carro deslizable de la maquina utilizada en los ensayos.

- **Placas porosas.** Se precisan dos placas porosas resistentes a la corrosión, con unas dimensiones de unos 0,5 mm inferiores a las dimensiones interiores de la caja de corte. Su porosidad debe permitir el libre drenaje del agua durante el ensayo, evitando la intrusión de partículas de suelo en sus poros. Deben ser lo suficientemente rígidas para soportar la carga vertical durante el ensayo, sin que se produzcan deformaciones apreciables. En la Figura 2.6 se muestra la placa porosa utilizada.

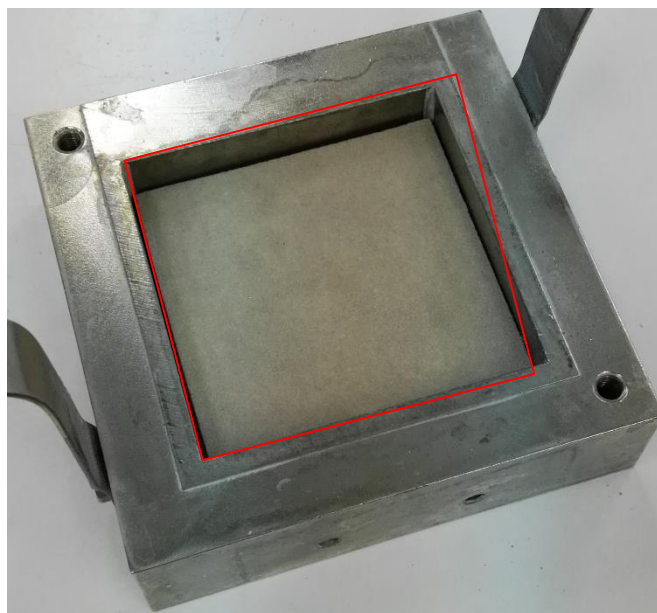


Figura 2.6. Placa porosa utilizada en este trabajo.

- **Placas ranuradas.** Se precisan dos juegos de placas ranuradas, uno con orificios y otro sin ellos, que tengan igual sección en planta que las placas porosas. Dichas placas deben ser lo suficientemente rígidas para soportar la carga vertical durante el ensayo, sin que se produzcan deformaciones apreciables. En la Figura 2.7 se muestran las placas ranuradas utilizadas en este trabajo.

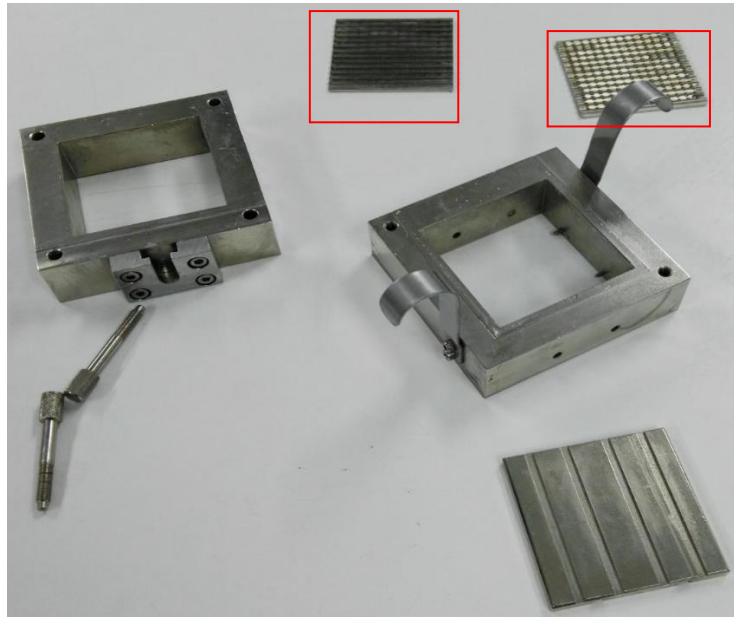


Figura 2.7. Placas ranuradas utilizadas en los ensayos.

- **Pistón de carga.** El pistón de carga debe tener la rigidez suficiente para transmitir a la probeta la carga vertical sin que se produzcan deformaciones apreciables. Sus dimensiones deben ser unos 0,5 mm inferiores a las dimensiones interiores de la caja de corte, y debe disponer de un asiento central en forma de casquete esférico, para obtener así el efecto rotula. Se debe situar el pistón de carga sobre la placa porosa. En la Figura 2.8. se muestran los componentes de la caja de corte para probetas de sección cuadrada. Todos estos componentes deben ser resistentes a la corrosión por reacción electroquímica del acero.



Figura 2.8. Componentes de la caja de corte (Norma UNE 103401).

En la Figura 2.9 se puede observar el pistón de carga de la máquina de corte utilizada.

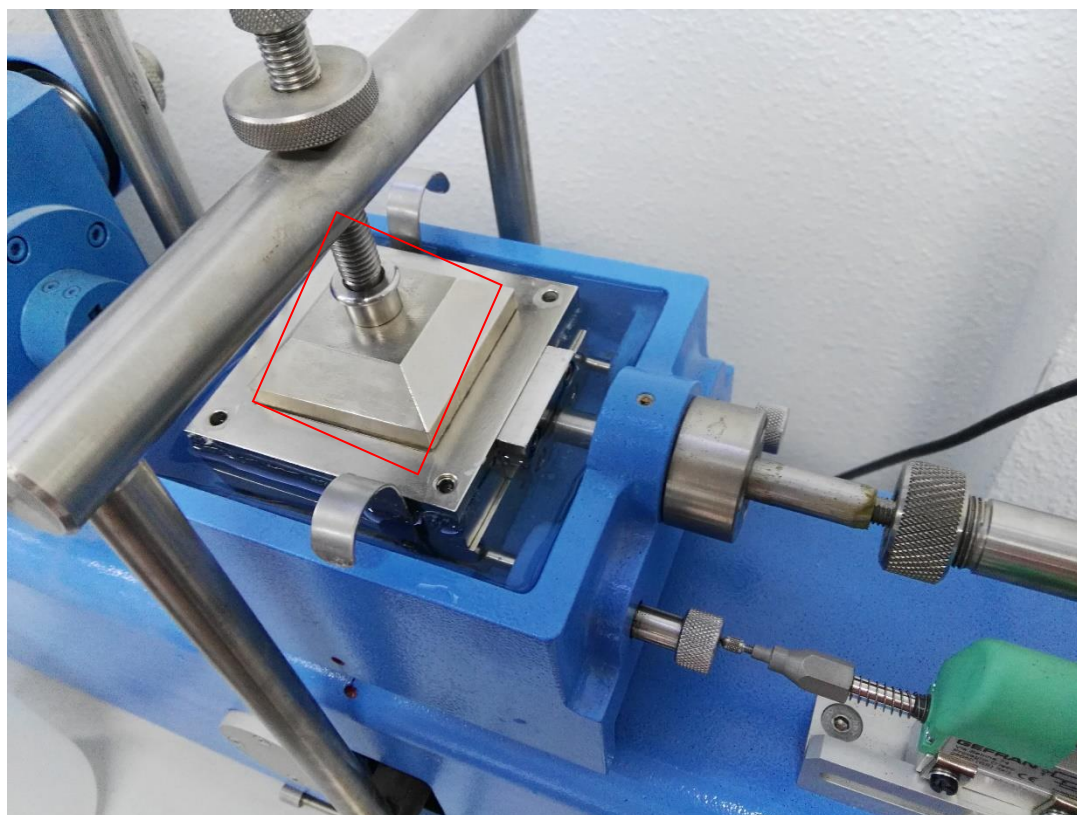


Figura 2.9. Pistón de carga de la máquina de corte utilizada.

- **Yugo de aplicación de cargas.** Se precisa de un yugo contrapesado, de masa conocida, para la aplicación a la probeta de una carga vertical, la cual se debe conocer con una precisión del 1%. Para valores elevados de la carga vertical, se debe disponer de un sistema de palanca contrapesado. Es conveniente además que el yugo disponga de algún sistema de bloqueo para poder aplicar la carga vertical suavemente, sin impactos.
- **Sistema motorizado de aplicación del esfuerzo horizontal.** Un sistema motorizado con una gama de velocidades adecuadas, capaz de aplicar una fuerza horizontal a la probeta, de manera que la velocidad de desplazamiento sea constante y apropiada al ensayo. Debe disponer del recorrido suficiente para aplicar a la probeta un desplazamiento mínimo de 8mm.

- **Medidor de fuerza.** Un aparato medidor de fuerza, calibrado y montado apropiadamente. Su capacidad puede variar entre 2 kN y 10 kN. Se debe escoger el más adecuado en función de la resistencia esperada.

El aparato medidor de fuerza puede ser, indistintamente, un anillo dinamométrico o un transductor de fuerzas.

- **Medidor de desplazamiento horizontal.** Un comparador o un transductor de desplazamiento, debidamente montado, para medir el desplazamiento horizontal relativo entre las dos mitades de la caja de corte. Debe tener una precisión de 0,01 mm y un recorrido mínimo de 10 mm.

La forma más usual de cuantificar el desplazamiento horizontal consiste en medir el desplazamiento relativo del carro respecto a la bancada, descontando a continuación de este valor la correspondiente deformación del anillo dinamométrico, en el caso de que se utilice este.

El método más directo consiste en fijar el medidor de desplazamiento sobre el extremo del aparato de medida de fuerzas horizontales, con la punta del palpador apoyada en el carro. En la Figura 2.10 se puede ver el medidor de desplazamiento horizontal de la máquina de corte utilizada.



Figura 2.10. Medidor de desplazamiento horizontal.

- **Medidor de desplazamiento vertical.** Un comparador o un transductor de desplazamiento, para medir la deformación vertical de la probeta de suelo durante el ensayo, con una precisión de 0,01 mm. En la Figura 2.11 se puede observar el medidor de desplazamiento vertical de la máquina de corte utilizada.



Figura 2.11. Medidor de desplazamiento vertical.

2.3 Procedimientos operativos

A continuación, se especifican los procedimientos operativos en función de cada tipo de ensayo. En este apartado pese a que el trabajo se basa en el ensayo consolidado – drenado(CD) y el ensayo consolidado – no drenado(CU), se van a describir también el ensayo no consolidado – no drenado(UU) y el ensayo con varias pasadas, estos últimos solo desde un punto de vista teórico ya que no se han llevado a la práctica dichos ensayos.

2.3.1 Ensayo consolidado – no drenado (CU)

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

Si fuese necesario se aproxima la caja de corte hasta que haga contacto con el pistón de empuje del motor, actuando para ello manualmente sobre éste. Ajustar seguidamente el aparato medidor de fuerza horizontal, para que exista un buen contacto entre el extremo del yugo en forma de cuello de cisne de la caja de corte y el extremo del aparato de la medida de fuerzas horizontales.

Se debe verificar que el pistón de empuje del motor tiene recorrido mínimo de 12 mm 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 centrado, y medir la altura, h_4 , desde la parte superior del pistón de carga hasta la caja de corte, con una precisión de 0,1 mm.

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, centrándolo si fuera 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 0,1 mm. La diferencia $h_4 - h_5$ es el asiento producido en la probeta, debido al yugo.

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

Consolidación. Normalmente las arenas secas y las arenas saturadas consolidan rápidamente; en estos casos no son necesarias las lecturas de consolidación para determinar la velocidad de corte apropiada. Sin embargo, en los suelos cohesivos se deben tomar las lecturas de la deformación vertical durante la consolidación.

Una vez finalizadas las operaciones descritas en el apartado anterior, se colocan suave y lo más rápidamente posible, las pesas necesarias en el colgadero del yugo de las fuerzas verticales para conseguir la tensión vertical deseada, σ_n , en kPa. Esta tensión debe ser fijada por el técnico responsable. A continuación, se pone en marcha el cronometro.

Se llena tan pronto como sea posible el carro deslizante con agua destilada hasta el nivel superior de la probeta y se mantiene así durante todo el ensayo, teniendo especial cuidado de evitar las pérdidas de agua por evaporación o por cualquier otra causa. Si se ensayan suelos secos o semisaturados, esta operación de llenado de agua del carro no se realiza.

Determinación de la velocidad de rotura. Para determinar la velocidad de rotura que hay que aplicar, se puede seguir uno de los tres procedimientos que se indican a continuación:

Método logarítmico o de Casagrande. Nada más poner en marcha el cronometro, se toman las lecturas de la deformación vertical y del tiempo transcurrido a unos intervalos que permitan representar en un gráfico, la deformación vertical en ordenadas y el logaritmo del tiempo transcurrido en abscisas, Figura 2.12. Se

continúan tomando lecturas hasta que finalice la consolidación primaria. En la mayoría de los suelos suele ser suficiente con 24 horas.

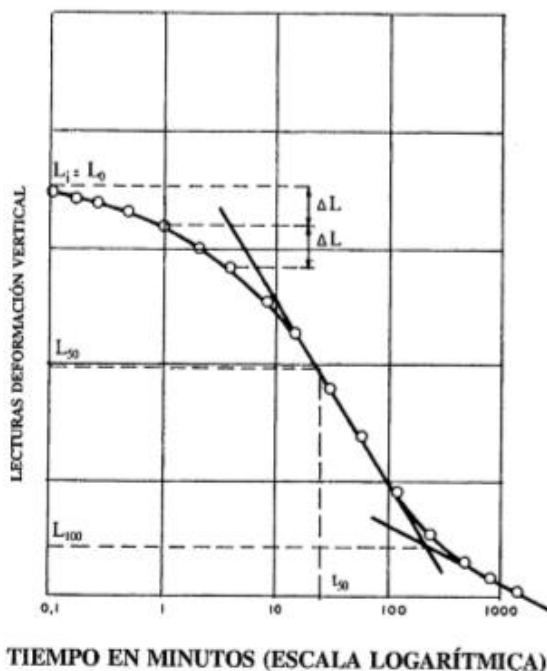


Figura 2.12. Método logarítmico o de Casagrande (Norma UNE 103401).

Para obtener la lectura teórica de la deformación vertical, L_0 , en el instante $t=0$, siempre que la parte inicial de la curva sea parabólica, se seleccionan en abscisas dos tiempos que estén en la relación de 1 a 4. Por dichos puntos se levantan las correspondientes ordenadas hasta que corten a la curva de consolidación. La diferencia de las ordenadas de estos dos puntos de intercesión se añade a la ordenada del primero. La paralela al eje de abscisas por este nuevo punto corta al eje de ordenadas en L_0 . La diferencia entre la primera lectura, L_1 , y la corregida, L_0 , corresponde al asiento inicial. Si las dos lecturas coinciden el asiento inicial es nulo, aunque en general esto no suele ocurrir.

La lectura corregida correspondiente al 100% de consolidación primaria, L_{100} , es la ordenada del punto de intersección entre la prolongación de la parte final de la curva, normalmente recta, y la tangente en el punto de inflexión.

La lectura correspondiente al 50% de la consolidación primaria, L_{50} , es:

$$L_{50} = \frac{L_0 + L_{100}}{2}$$

El tiempo correspondiente al 50% de la consolidación primaria, t_{50} , se halla directamente sobre el gráfico, trazando desde L_{50} una recta horizontal hasta que corte a la curva. Desde ese punto se traza una vertical; el punto de corte con el eje de abscisas es t_{50} .

El coeficiente de consolidación, C_v , para el incremento de carga aplicada, y para el 50% de la consolidación primaria, se determina mediante la expresión:

$$C_v = \frac{0,196H^2}{t_{50}}$$

Donde:

- H es el máximo camino de drenaje en el 50% de la consolidación primaria, es decir, la mitad de la altura de la probeta en el instante t_{50} .

El tiempo necesario para alcanzar la máxima resistencia al corte, t_f , se determina mediante la siguiente ecuación:

$$t_f = \frac{H^2}{2C_v(1 - U_f)}$$

Donde:

- U_f es el grado de disipación de presiones intersticiales en tanto por uno, cuyo valor más usual es 0,95.

En este momento se debe estimar para qué desplazamiento horizontal, d_f , se alcanza la resistencia de corte máxima. En función del tipo de suelo que tengamos tendremos los siguientes desplazamientos horizontales como se puede observar en la Tabla 2.1.

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

Tabla 2.1. Desplazamiento de la caja en función del tipo de suelo (Norma UNE 103401).

Finalmente, para obtener la máxima velocidad de desplazamiento horizontal, V_{max} , en mm/min, se aplica la siguiente expresión:

$$V_{max} = \frac{d_f}{t_f}$$

Método de Taylor o de la raíz cuadrada del tiempo. Nada más poner en marcha el cronometro, se toman lecturas de la deformación vertical y del tiempo transcurrido, a unos intervalos que permita representar en un gráfico, la deformación vertical en ordenadas y la raíz cuadrada del tiempo en minutos, en abscisas, como podemos observar en la Figura 2.13. Se continúan tomando lecturas hasta que finalice la consolidación primaria. En la mayoría de los suelos suele ser suficiente 24 horas.

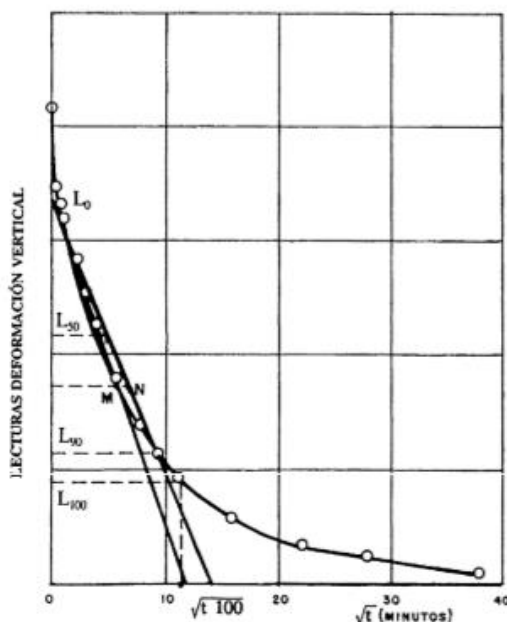


Figura 2.13. Método de Taylor o de la raíz cuadrada del tiempo (Norma UNE 103401).

En este tipo de representación la parte inicial de la curva de consolidación es prácticamente una línea recta, cuya prolongación corta al eje de ordenadas en el punto que corresponde al cero corregido, L_0 . Se elige un punto cualquiera de esta recta, por ejemplo, M en la figura 2.5. y por él se traza la paralela al eje de abscisas. El valor de la abscisa del punto se multiplica por 1,15 y el resultado es un nuevo punto N, sobre la recta anterior, que unido con L_0 proporciona otra recta. Su intersección con la curva de consolidación determina un punto cuya abscisa es t_{90} y cuya ordenada es L_{90} .

La lectura corregida correspondiente al 100% de la consolidación primaria, L_{100} , se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L_{100} = L_0 - \frac{10}{9}(L_0 - L_{90})$$

La lectura correspondiente al 50% de la consolidación primaria, L_{50} , es:

$$L_{50} = \frac{L_0 + L_{100}}{2}$$

El coeficiente de consolidación, C_v , para el incremento de carga aplicada, y para el 90% de la consolidación primaria, se determina mediante la expresión:

$$C_v = \frac{0,848H^2}{t_{90}}$$

Donde:

- H es el máximo camino de drenaje en el 90% de la consolidación primaria, es decir, la mitad de la altura de la probeta en el instante t_{90} y se determina mediante la siguiente expresión:

$$H = H_0 - \frac{L_0 + L_{100}}{2}$$

Donde:

- H_0 es la altura inicial de la probeta en el instante inicial de la aplicación de la carga de consolidación.

El tiempo necesario para alcanzar la máxima resistencia al corte, t_f , se determina mediante la siguiente ecuación:

$$t_f = \frac{H^2}{2C_v(1 - U_f)}$$

Donde:

- U_f es el grado de disipación de presiones intersticiales en tanto por uno, cuyo valor más usual es 0,95.

En este momento se debe estimar para qué desplazamiento horizontal, d_f , se alcanza la resistencia de corte máxima.

Finalmente, para obtener la máxima velocidad de desplazamiento horizontal, V_{max} , en mm/min, se aplica la siguiente expresión:

$$V_{max} = \frac{d_f}{t_f}$$

Método directo. Como continuación del método de Taylor se obtiene el valor de t_{100} trazando una paralela al eje de abscisas por el punto correspondiente a L_{100} , hasta que corte a la curva de asiento. La abscisa de este punto corresponde a t_{100} .

A partir de t_{100} se obtiene el tiempo final, t_f , mediante la expresión:

$$t_f = 12,7 * t_{100}$$

En este momento se debe estimar para que desplazamiento horizontal, d_f , se alcanza la resistencia de corte máxima.

Finalmente, para obtener la máxima velocidad de desplazamiento horizontal, V_{max} , en mm/min, se aplica la siguiente expresión:

$$V_{max} = \frac{d_f}{t_f}$$

Ajustes antes de la rotura. Antes de realizar la rotura de la probeta hay que 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 dura entre 5 minutos y 10 minutos. En suelos cohesivos, la velocidad de desplazamiento no debe sobrepasar la V_{max} calculada por cualquiera de los tres métodos anteriores.

Se debe comprobar que todos los 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. Actos 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 la mitad inferior 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 la deformación vertical, deformación horizontal y fuerza horizontal.

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 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 continua 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.

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

Se extrae el agua que rodea a la probeta, 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_o , con una precisión de 0,01 g. Se deseca en 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 tanto por ciento. Esta humedad es la que tenía el suelo al final de la consolidación, pues la rotura se realizó sin permitir el flujo de agua hacia desde la probeta.

2.3.2 Ensayo consolidado –drenado (CD)

Este ensayo se realiza únicamente en suelos cohesivos arcillosos, pues la fase de rotura se realiza en condiciones no drenadas.

Ajustes iniciales. Se seguirá el mismo procedimiento que para el ensayo consolidado – drenado (CD), explicado en el apartado anterior.

Consolidación. Se colocan, suave y tan rápidamente como sea posible, las pesas necesarias en el colgadero del yugo de fuerzas verticales para conseguir la tensión vertical deseada, σ_n , en kPa. Esta tensión debe ser fijada por el técnico responsable. Después, se anota la hora inicial de esta fase y se pone en marcha el cronometro.

Se llena, tan pronto como sea posible, el carro deslizante con agua hasta el nivel superior de la probeta y se mantienen así durante todo el ensayo.

En este caso no se toman lecturas de la deformación vertical con el tiempo, pues la rotura se realiza en condiciones no drenadas. Se prosigue la consolidación hasta el final de la consolidación primaria. Normalmente son suficientes 24 horas en la mayoría de los suelos cohesivos.

Finalizada la consolidación, se toma la lectura del medidor de deformaciones verticales.

Ajustes antes de la rotura. Antes de la rotura de la probeta se debe elegir la velocidad de desplazamiento horizontal. Esta tiene que ser lo suficientemente rápida para que la rotura se produzca sin permitir el drenaje del agua de los poros. Una velocidad entre 0,5 mm/min y 1,5 mm/min puede ser apropiada.

Se debe comprobar que todas las componentes horizontales están en contacto, pero sin carga y que los dos tornillos pasadores que fijan las dos mitades de la caja de corte han sido retirados.

Se separan las dos mitades de la caja de corte, actuando sobre los dos tornillos separadores al mismo tiempo. Media vuelta es suficiente.

Se anotan las lecturas iniciales de los medidores de desplazamientos 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 mitades de la caja de corte a su posición inicial.

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

Se extrae el agua que rodea a la probeta, se desmontan 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 0,01 g.

Se deseca en 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 tanto por ciento. Esta humedad es la que tenía el suelo al final de la consolidación, pues la rotura se realizó sin permitir el flujo de agua hacia o desde la probeta.

2.3.3 Ensayo no consolidado – no drenado (UU)

Este ensayo se realiza únicamente en suelos cohesivos arcillosos, pues no hay consolidación inicial y la rotura se realiza en condiciones no drenadas.

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

Si fuese necesario, se aproximan la caja de corte y el pistón de empuje del motor, actuando para ello manualmente sobre éste. Ajustar seguidamente el aparato medidor de fuerza horizontal para que exista un buen contacto entre el extremo del yugo en forma de cuello de cisne de la caja de corte y el extremo del aparato de medida de fuerzas horizontales.

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

Se sitúa el medidor de desplazamiento en posición, fijándolo y poniéndolo a cero junto con el medidor de fuerzas. Se debe comprobar que dicho medidor de desplazamiento tiene recorrido suficiente.

Se debe comprobar también que el pistón de carga vertical está perfectamente centrado.

Acto seguido, se ensambla el yugo de aplicación de la fuerza vertical, haciendo que descansa dicho yugo 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, centrándolo si fuese necesario.

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

Ajustes antes de la rotura. Se seguirá el mismo procedimiento descrito para el ensayo consolidado – no drenado (CU).

Rotura de la probeta. Se sigue también el procedimiento descrito para el ensayo consolidado – no drenado (CU). Aunque en este caso, no es necesario determinar la masa humedad final de la probeta, pues se supone que no ha variado respecto de la inicial ya conocida, al realizar este ensayo sin consolidación y sin drenaje.

2.3.4 Ensayo con varias pasadas. Resistencia residual

Estos ensayos permiten determinar los parámetros de resistencia residual, C_R y Φ_R , para cualquiera de los tipos de ensayos normales.

Ensayos consolidados – drenados (CD). Una vez finalizado el ensayo normal y parado el motor, se vuelve la caja de corte a su posición inicial siguiendo alguno de los procedimientos siguientes:

- Procedimiento 1. Aplicando una velocidad al motor en sentido inverso al del ensayo normal, hasta que las dos mitades de la caja de corte coincidan. La velocidad aplicada se elige de manera que el tiempo que se tarde en llevar la caja de corte a su posición inicial sea aproximadamente igual al tiempo que en el ensayo normal se tarda en alcanzar la resistencia al corte máxima.
- Procedimiento 2. Se llevan las dos mitades de la caja de corte a su posición inicial, actuando manualmente sobre el motor en una operación que dure unos pocos minutos. Se deja en reposo hasta el día siguiente, para establecer el equilibrio de presiones.
- Procedimiento 3. Se aplican de 5 a 10 pasadas actuando manualmente, con una duración de unos pocos minutos cada pasada, para establecer un plano de corte; se finaliza en la posición inicial del ensayo normal. Se deja 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.

Se repite el proceso de rotura descrito para el ensayo normal, aplicando una velocidad de desplazamiento igual a la de dicho ensayo.

Se repiten las operaciones anteriores tantas veces como sea necesario, hasta obtener un valor prácticamente constante de la resistencia al corte. Se para el motor.

Se extrae el agua que rodea a la caja de corte. En los ensayos drenados se deja drenar las placas porosas unos 10 min.

Se descarga de pesas el colgadero de aplicación de las fuerzas verticales y se retira el yugo del pistón de carga.

Se extrae la probeta de la caja de corte.

Se determina la masa húmeda final de la probeta, m_{hf} , con una precisión de 0,01 g.

Se deseca en 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 tanto por ciento.

Ensayos consolidados – no drenados y ensayos no consolidados – no drenados. Una vez finalizado el ensayo normal, se actúa con el motor en sentido inverso o manualmente llevando las dos mitades de la caja de corte a su posición inicial, en una operación que dure unos pocos minutos.

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.

Se repite el proceso de rotura descrito para el ensayo normal, aplicando una velocidad de desplazamiento igual a la de dicho ensayo.

Se repiten las operaciones anteriores tantas veces como sea necesario, hasta obtener un valor prácticamente constante de la resistencia al corte. Se para el motor.

Se extrae el agua que rodea a la caja de corte. En los ensayos drenados se dejan drenar las placas porosas unos 10 min.

Se descarga de pesas el colgadero de aplicación de las fuerzas verticales y se retira el yugo del pistón de carga.

Se extrae la probeta de la caja de corte.

Se determina la masa húmeda final de la probeta, m_{hf} , con una precisión de 0,01 g.

Se deseca en 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 tanto por ciento.

2.4 Puesta en marcha del ensayo de corte directo

2.4.1 Operaciones y medidas iniciales

Previamente al comienzo del ensayo es necesario 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 anclada 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 0,01 g.
- Masa del tallador, m_t , con una precisión de 0,01 g.
- Altura del tallador, h_t , con una precisión de 0,1 mm.
- Altura de la mitad superior de la caja de corte, h_c , con una precisión de 0,1 mm.
- 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 0,1 mm.
- 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 0,1 mm.
- Espesores de cada placa porosa, y de cada placa ranurada que se vayan a utilizar en el ensayo con una precisión de 0,1 mm. Se calcula el espesor total de las placas usadas en el ensayo, h_t , con una precisión de 0,1 mm.

2.4.2 Preparación y montaje de las probetas para el ensayo

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.

El tallado de las probetas se realizará con un tallador metálico, resistente a la corrosión, de forma cuadrada o circular, de iguales dimensiones internas que las de la probeta, y de la misma altura que la mitad superior de la caja de corte. Debe tener un borde biselado cortante y sus paredes interiores disponer de un rebaje, similar al que

tienen los dispositivos de toma de muestras inalteradas. En las Figuras 2.14 y 2.15 se puede observar el proceso de montaje de las probetas.



Figura 2.14. Montaje de la probeta.



Figura 2.15. Montaje de la probeta.

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

En el caso de las cajas de corte, el tamaño máximo de la partícula de suelo no debe ser superior a la décima parte de la altura de la probeta.

2.4.3 Suelo cohesivo remoldeado

El suelo recibido en el laboratorio se prepara de la siguiente manera. Se desmenuza y se seca al aire o en estufa a menos de 60 °C, retirando cualquier partícula de tamaño superior al máximo permitido de 1/10 de la altura de la altura de la probeta. Si se seca se debe determinar la humedad higroscópica.

La probeta de suelo se puede preparar con una densidad seca determinada, o compactándola aplicando una energía determinada.

Con densidad seca determinada. Del suelo preparado, se toma la cantidad necesaria para conseguir la densidad seca deseada, y se anota su masa, m_{di} , con una precisión de 0,01 g. Se añade la cantidad de agua necesaria para conseguir la humedad requerida, mezclando íntimamente para homogeneizar la humedad. En caso de suelos muy plásticos, se debe dejar en cámara húmeda durante unas 24 horas, al objeto de lograr una buena homogeneización.

El suelo así preparado, se vierte en la caja de corte montada con la placa base, la placa ranurada con la cara lisa hacia arriba y una placa porosa. Se coloca la caja de corte sobre una prensa. Se sitúa el suelo la pieza prismática. Actuando manualmente o con una pequeña velocidad, se lleva el plato de la prensa hasta conseguir el contacto con la pieza prismática.

Manteniendo una velocidad baja, se va introduciendo dicha pieza en la caja de corte, bien hasta que haga tope o hasta que la marca quede enrasada con el borde superior de la caja, según sea la pieza.

Se para la prensa y se invierte el sentido de la marcha. Se retira la pieza prismática, se coloca una placa porosa sobre la probeta y se ejerce sobre ella una pequeña presión con objeto de asegurar un buen contacto. Se mide la distancia, h_2 , desde el borde superior de la caja de corte hasta la superficie de dicha placa con una precisión de 0,1 mm. Sobre esta, se disponen la placa ranurada y el pistón de carga.

Compactación dinámica a una energía determinada. El procedimiento que se describe a continuación utiliza la energía del ensayo Proctor normal de $0,583 J/cm^3$, ya que es la más usual. No obstante, se puede utilizar cualquier otra, dependiendo de las peculiaridades de cada caso.

Normalmente se compacta el suelo para obtener una probeta con el equipo del ensayo Proctor normal, según el procedimiento descrito en la norma UNE 103500 y de esta se tallan tres probetas de suelo para efectuar el ensayo de corte o se compactan directamente cada probeta en la mitad superior de la caja de corte.

Compactación en el molde Proctor normal. Del suelo preparado para nuestro suelo cohesivo remoldeado, se toma la cantidad necesaria para llenar el molde Proctor normal. Se determina la masa de suelo utilizado y se añade la cantidad de agua necesaria para conseguir la humedad deseada. Se amasa perfectamente con objeto de homogeneizar la mezcla.

Se compacta mediante la maza del ensayo Proctor normal, siguiendo el procedimiento operatorio descrito en la Norma UNE 103500. Si se quiere compactar con otra energía diferente a la de ese ensayo, se debe modificar el número de golpes, la masa de la maza, etc., en la forma apropiada para este propósito. En cada caso se debe hacer constar en el informe la energía utilizada.

Una vez finalizada la compactación, se extrae el suelo compactado del molde y se sella para evitar cualquier pérdida de humedad. Hasta el momento de tallado se debe guardar en cámara húmeda.

Para la preparación y tallado de las probetas se sigue el procedimiento o descrito para suelo cohesivo inalterado.

Debido al proceso de compactación utilizado, se pueden dar ligeras diferencias de densidad a lo largo de la altura de la probeta. Se debe evitar que la superficie de corte del ensayo coincida con la de separación entre capas.

Compactación directa sobre la mitad sobre la mitad superior de la caja. Del suelo cohesivo remoldeado, se toma la cantidad precisa para obtener una probeta y se añade la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad requerida. Se amasa perfectamente para homogeneizar la humedad. En suelos muy plásticos, se debe guardar la mezcla debidamente sellada en cámara húmeda.

Se coloca la base de compactación, sobre un soporte de rigidez conveniente y sobre ella la mitad superior de la caja de corte cuadrada de 60 mm x 60 mm, que debe llevar incorporado el collarín, fijando todo el conjunto a la base mediante los dos tornillos pasadores.

Se compacta el suelo, mediante la maza tipo Army de 0,5 kg, distribuido en tres capas aproximadamente del mismo espesor, aplicando 18 golpes en cada capa, con un reparto uniforme. Mediante esta compactación se ha aplicado aproximadamente la energía del ensayo Proctor normal de $0,583 J/cm^3$. Se puede aplicar otra energía, modificando para ello el número de golpes, la altura de caída, etc., de forma apropiada.

Se desmonta y se enrasa la cara superior. Se toma una pequeña cantidad del suelo sobrante para determinar la humedad y se halla la masa del suelo húmedo más la

mitad superior de la caja de corte, para halla la masa húmeda inicial de la probeta, m_{hi} .

Se colocan la placa base anclada, la placa ranurada y una placa porosa en la mitad inferior de la caja de corte. Sobre esta se monta la mitad superior de la caja, fijando ambas con los tornillos pasantes, y se introduce la probeta hasta que descansa sobre la placa porosa.

Se sitúa sobre la probeta otra placa porosa y se mide la distancia, h_2 , en mm, entre el borde superior de la caja de corte y la superficie de dicha placa con una precisión de 0,1 mm.

Se colocan la placa ranurada y el pistón de carga sobre la placa porosa

2.4.4 Preparación y montaje de las probetas para el ensayo

Se seguirá el procedimiento explicado la norma UNE 103300, que básicamente consiste en pesar una muestra de la probeta antes de ensayar y meterla en una estufa a 70°C durante 24 horas y por diferencia de peso obtendremos la humedad. En la Figura 2.16 se puede observar como pesamos una muestra de arcilla húmeda.



Figura 2.16. Peso de una muestra de arcilla húmeda.

En la Figura 2.17 se puede observar la muestra de arcilla colocada en la estufa.



Figura 2.17. Colocación de la muestra de arcilla húmeda en una estufa a 70°C durante 24 horas.

Y realizar también el mismo proceso después del ensayo con la muestra de arcilla consolidada.

2.5 Obtención y representación de los resultados

2.5.1 Datos generales

En primer lugar, numeraremos nuestro ensayo y diremos también que tipo de ensayo estamos realizando, en este trabajo como se ha dicho antes se realizaran dos tipos de ensayos el consolidado – drenado(CD) y el consolidado – no drenado(CU) por lo que se indicará. La localización será en todos los ensayos el laboratorio de geotecnia de la Universidad Politécnica de Cartagena. En la Tabla 2.2 se muestra la información general del ensayo.

Información general acerca del ensayo	
Ensayo nº	
Tipo de ensayo	
Localización	Laboratorio Geotécnica UPCT

Tabla 2.2. Información general del ensayo

En cuanto a las dimensiones de la caja de corte se calcularán varias medidas que nos serán necesarias en los posteriores cálculos.

En una muestra cohesiva, h se debe determinar, conociendo h_c, h_b, h_p y h_r , mediante la expresión:

$$h = h_c - 2h_r - 2h_p - h_b$$

Donde:

- h_c es la altura de la caja de corte, en mm .
- h_r es el espesor de las placas ranuradas, en mm .
- h_p es el espesor de las placas porosas, en mm .
- h_b es el espesor de la placa base, en mm

El área de la probeta será el producto de las dimensiones interiores de la caja:

$$A(mm^2) = L_1 * L_2$$

En la Tabla 2.3 se muestran las medidas anteriormente mencionadas, ya que serán las mismas para todos los ensayos realizados.

Dimensiones de la caja de corte		
Dimensión interior caja(L1)	60	mm
Dimensión interior caja(L2)	60	mm
Área inicial probeta(A=L1*L2)	3600	mm ²
Altura caja de corte(h_c)	50	mm
Altura placa porosa(h_p)	5	mm
Altura placa ranurada(h_r)	3	mm
Altura placa base(h_b)	6	mm
Altura inicial de la probeta($h=h_c-h_b-2*h_r-2*h_p$)	28	mm

Tabla 2.3. Dimensiones de la caja de corte.

En cuanto a volúmenes, calcularemos el volumen de la muestra en la célula con la siguiente fórmula:

$$V_1(\text{cm}^3) = (A * h)/1000$$

El caculo de V_2 sera realizado cada para ensayo ya que en cada ensayo el volumen variara de una forma distinta, tendremos que tener en cuenta el desplazamiento vertical que tenemos en cada caso. En la Tabla 2.4 se muestran los volúmenes en la célula antes y tras consolidar.

Volúmenes		Descripción	
V1	100,8	cm3	Volumen muestra en célula
V2		cm3	Volumen muestra en célula tras consolidar

Tabla 2.4. Volúmenes de la muestra.

Las masas se calcularan para cada ensayo por separado, la unica masa que tiene un poco mas de complicacion a la hora de calcularla es la masa de agua(W_9), que se calcula con la siguiente formula:

$$W_9 = \frac{\left(W_8 * \frac{W_{inicial}}{100}\right)}{\left(1 + \frac{W_{inicial}}{100}\right)}$$

Para nombrar las masas se seguiera la nomenclatura que se muestra en la Tabla 2.5.

Masas		Descripción	
W1		g	Célula+4 placas+ base+tornillos
W2		g	Célula con muestra puesta
W3		g	Célula con muestra al acabar ensayo
W4		g	Masa de una muestra de la arcilla preparada húmeda
W5		g	W4 tras 24 horas de estufa
W6		g	Masa de una muestra de la arcilla una vez ensayada, de la que hay en la célula
W7		g	W6 tras 24 horas de estufa
W8		g	Masa total=W2-W1=W9+W10
W9		g	Masa de agua
W10		g	Masa de solido=Masa total - Masa de agua=W8-W9

Tabla 2.5. Masas calculadas a lo largo de cada ensayo.

Una vez calculadas las medidas, masas y volúmenes pasamos a calcular las humedades, densidades e índices de grano.

Densidad aparente inicial. La densidad aparente, ρ , expresada en g/cm^3 , se determina mediante la ecuación:

$$\rho_{a, inicial} = \frac{m_{hi}}{V_1}$$

Donde:

- $m_{hi} = W_2 - W_1$ es la masa humedad de la probeta, en g.
- V_1 es el volumen de la muestra en la célula, en cm^3 .

Densidad aparente final. La densidad aparente, ρ , expresada en g/cm^3 , se determina mediante la ecuación:

$$\rho_{a, final} = \frac{m_{hf}}{V_2}$$

Donde:

- $m_{hf} = W_3 - W_1$ es la masa humedad de la probeta después del ensayo, en g.
- V_2 es el volumen de la muestra en la célula después del ensayo, en cm^3 .

Densidad relativa de las partículas. Este dato fue tomado de otro trabajo en el cual se utilizó el mismo tipo de arcilla. Se obtuvo un valor de:

$$Gs = 2,34 \text{ g/cm}^3$$

Humedad inicial. La humedad inicial, $w_{inicial}$, expresada en % se puede calcular tomando una pequeña cantidad de suelo durante la preparación de la probeta (W_4) y metiendo esa pequeña cantidad de suelo a estufa y pesarla a las 24 horas (W_5):

$$w_{inicial} = \frac{W_4 - W_5}{W_5} \times 100$$

Humedad final. La humedad inicial, w_{final} , expresada en % se puede calcular tomando una pequeña cantidad de suelo después de realizar el ensayo (W_6) y metiendo esa pequeña cantidad de suelo a estufa y pesarla a las 24 horas (7):

$$w_{final} = \frac{W_6 - W_7}{7} \times 100$$

Densidad seca inicial. La densidad seca, ρ_d , expresada en g/cm^3 , se determina mediante la ecuación:

$$\rho_{d,inicial} = \frac{W_{10}}{V_1}$$

Densidad seca final. La densidad seca, ρ_d , expresada en g/cm^3 , se determina mediante la ecuación:

$$\rho_{d,final} = \frac{W_{10}}{V_2}$$

Índice de huecos inicial. El índice de huecos inicial, e_i , adimensional, se determina mediante la ecuación:

$$e_{inicial} = \frac{G_s}{\rho_{d,inicial}} - 1$$

Donde:

- G_s es la densidad de las partículas, en g/cm^3 .

Índice de huecos final. El índice de huecos al final de la consolidación, al final del ensayo, o en un momento cualquiera, e , se determina mediante la ecuación:

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

Donde:

- Δh es el cambio de altura sufrida por la probeta, en el momento considerado, expresado en *mm*.
- h es la altura inicial de la probeta en *mm*.

En la Tabla 2.6 se muestran todos los parámetros anteriormente explicados.

Cálculos			Descripción
ρ_a (inicial)		g/cm ³	Densidad aparente inicial
ρ_a (final)		g/cm ³	Densidad aparente final
G_s	2,34	g/cm ³	Densidad relativa de las partículas
$W_{inicial}$		%	Humedad inicial
W_{final}		%	Humedad final
e_o		Ad.	Índice de huecos inicial
e_f		Ad.	Índice de huecos final
ρ_d (inicial)		g/cm ³	Densidad seca inicial
ρ_d (final)		g/cm ³	Densidad seca final

Tabla 2.6. Parámetros calculados a lo largo de cada ensayo.

2.5.2 Tensiones y desplazamientos

La máquina de corte mediante la controladora nos dará unos valores de desplazamiento horizontal, vertical y de carga. En la Tabla 2.7 se puede observar la nomenclatura de las tablas que nos proporcionara la controladora.

Hora [sec]	CH2: Desplazamiento [mm]	CH5: Desplazamiento [mm]	CH1: Carga [kN]
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
...

Tabla 2.7. Nomenclatura que nos dará la controladora para los desplazamientos y carga.

Se calcula la tensión normal aplicada a la probeta, σ_n , expresada en kPa, mediante la ecuación:

$$\sigma_{n,\text{sin corregir}} = \frac{F_{v,\text{sin corregir}}}{A}$$

Donde:

- F_v es la carga vertical (CH1) aplicada a la probeta, expresadas en kN .
- A es el área inicial de la probeta, expresada en mm^2 .

En la Tabla 2.8 se muestra el cálculo del área corregida y la tensión sin corregir, siguiendo el procedimiento anteriormente expuesto.

Hora [sec]	CH2: Desplazamiento [mm]	CH5: Desplazamiento [mm]	CH1: Carga [kN]	Área inicial (m2)	Tensión sin corr. (Kpa)
0	0	0	0	0,0036	0
1	0	0	0	0,0036	0
2	0	0	0	0,0036	0
3	0	0	0	0,0036	0
...

Tabla 2.8. Cálculo del Área inicial y Tensión sin corregir.

Ahora estos valores de carga no nos valen ya que han sido calculados para un área transversal de probeta constante, al desplazarse la célula en la dirección horizontal el área va poco a poco reduciéndose. El programa considera esta área como siempre la misma y esto no es correcto, por lo que tendremos que aplicar la fórmula del área corregida.

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

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

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, expresado mm .

En la Tabla 2.9 se incorpora el cálculo del area corregida, aplicando la formula anteriormente expuesta.

CH2: Desplazamiento [mm]	CH5: Desplazamiento [mm]	CH1: Carga [kN]	Área inicial (m2)	Tensión sin corr. (Kpa)	Área corregida (m2)
0	0	0	0,0036	0	0,0036
0	0	0	0,0036	0	0,0036
0	0	0	0,0036	0	0,0036
0	0	0	0,0036	0	0,0035
...

Tabla 2.9. Tabla con el cálculo del Área corregida.

Con el área corregida, calculamos la tensión normal corregida aplicada a la probeta, σ_n , expresada en kPa, mediante la ecuación:

$$\sigma_{n,corregida} = \frac{F_v}{A_c}$$

Donde:

- F_v es la carga vertical (CH1) aplicada a la probeta, expresadas en *kN*.
- A_c es el área inicial de la probeta, expresada en *mm²*.

En la Tabla 2.10 se le añade el cálculo de la tensión corregida, aplicando su fórmula correspondiente.

CH1: Carga [kN]	Área inicial (m2)	Tensión sin corr. (Kpa)	Área corregida (m2)	Tensión corregida (Kpa)
0	0,0036	0	0,0036	0
0	0,0036	0	0,0036	0
0	0,0036	0	0,0036	0
0	0,0036	0	0,0035	0
...

Tabla 2.10. Tabla con el cálculo de la tensión corregida.

Ya para el cálculo de la carga corregida solo nos quedaría multiplicar la tensión corregida por el área inicial.

$$F_{v,corregida} = \sigma_{n,corregida} * A$$

En la Tabla 2.11 se muestra la carga corregida que es el objetivo de este apartado.

Área inicial (m2)	Tensión sin corr. (Kpa)	Área corregida (m2)	Tensión corregida (Kpa)	Carga Corregida (kN)
0,0036	0	0,0036	0	0
0,0036	0	0,0036	0	0
0,0036	0	0,0036	0	0
0,0036	0	0,0035	0	0
...

Tabla 2.11. Tabla con la carga corregida.

2.5.3 Representaciones gráficas

En un ensayo normal se deben realizar los siguientes pasos:

1. En un gráfico, se representan en ordenadas las tensiones tangenciales expresadas en kPa y en abscisas el desplazamiento horizontal, expresado en mm, correspondiente a cada una de las probetas ensayadas.
2. De cada relación tensión – deformación, se toman el valor de la resistencia tangencial máxima, τ_{max} , en kPa y la deformación horizontal correspondiente.
3. En un mismo grafico se representan en escala decimal, la tensión tangencial máxima, τ_{max} , en kPa, en ordenadas y la tensión normal, σ_n , en kPa, en abscisas, para cada una de las tres probetas analizadas en el ensayo. Es imprescindible que la escala utilizada en ambos ejes sea la misma.
Estimando que la relación entre τ_{max} y σ_n es lineal, la pendiente de la línea de mejor ajuste y el punto de corte con el eje de ordenadas dan los parámetros resistentes del suelo, ángulo de rozamiento interno y cohesión, respectivamente.
4. Se puede representar el cambio de altura que experimenta la probeta durante el ensayo (deformación vertical) en mm, en ordenadas, y el desplazamiento horizontal, en mm, en abscisas. Es conveniente expresar los cambios de altura en forma de índices de huecos, según la expresión vista anteriormente.

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

3 Pruebas de laboratorio

3.1 Selección de muestras

Como se puede observar en las Tablas 3.1 y 3.2, la arcilla crema tanto para la muestra orientada como para la no orientada, el componente principal de la arcilla es la Kaolinita.

La arcilla crema se sometió al difractómetro de rayos X en el Servicio de Instrumentación Tecnológica y Apoyo a la Investigación Tecnológica de La Universidad Politécnica de Cartagena, y se obtuvieron los siguientes gráficos que se puede observar en las Figuras 3.1 y 3.2.

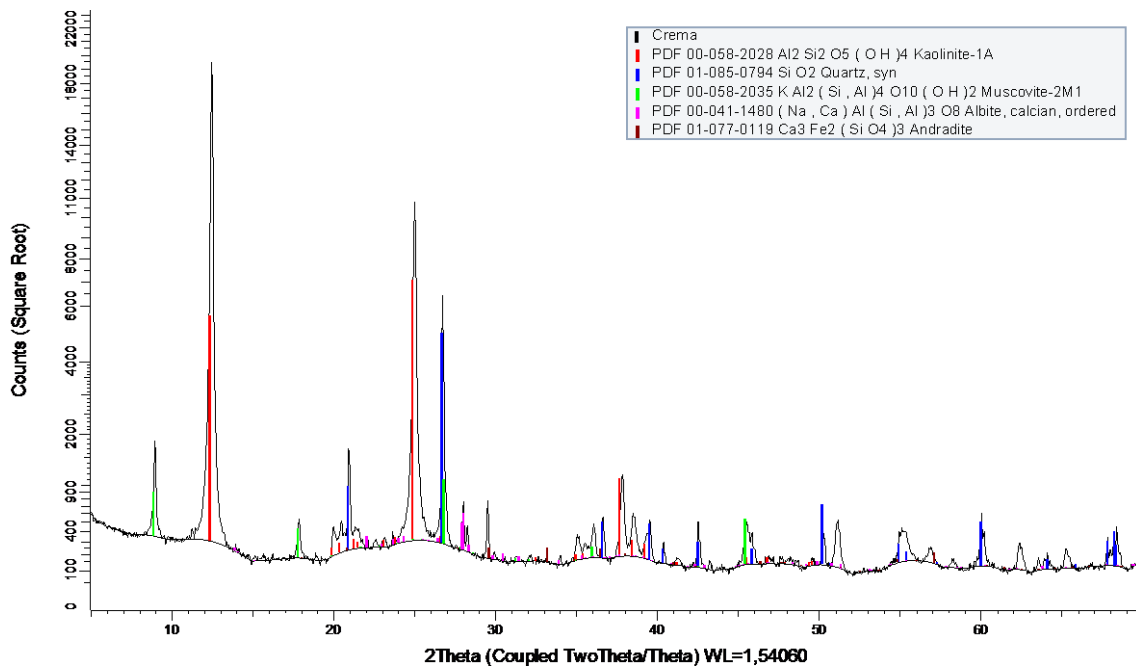


Figura 3.1. Componentes de la arcilla crema no orientada.

Show	Color	Scan	Name	Compound Name	Formula	I/Ic DB	I/Ic User	S-Q	System	Space Group
Yes	Red	Crema.raw #1	PDF 00-058-2028	Kaolinite-1A	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-1	0	63,0%	Triclinic	P1 (1)
Yes	Lime	Crema.raw #1	PDF 00-058-2035	Muscovite-2M1	KAl ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-1	0,4	19,2%	Monoclinic	C2/c (15)
Yes	Blue	Crema.raw #1	PDF 01-085-0794	Quartz, syn	Si O ₂	3,11	0	14,1%	Hexagonal	P3221 (154)
Yes	Magenta	Crema.raw #1	PDF 00-041-1480	Albite, calcian, ordered	(Na, Ca) Al (Si, Al) ₃ O ₈	1,06	0	3,2%	Triclinic	C-1 (2)
Yes	DarkRed	Crema.raw #1	PDF 01-077-0119	Andradite	Ca ₃ Fe ₂ (Si O ₄) ₃	1,97	0	0,5%	Cubic	la-3d (230)

Tabla 3.1. Componentes de la arcilla crema no orientada.

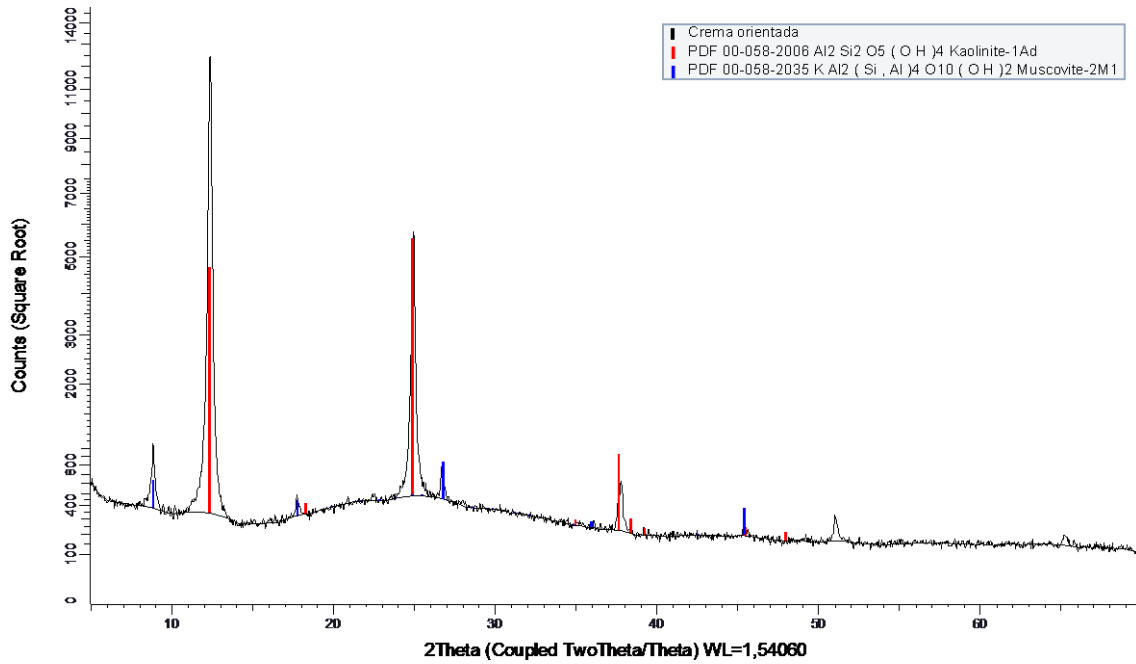


Figura 3.2. Componentes de la arcilla crema orientada.

Show	Color	Scan	Name	Compound Name	Formula	I/Ic DB	I/Ic User	S-Q	System	Space Group
Yes	Red	Crema orientada.raw #1	PDF 00-058-2006	Kaolinite-1Ad	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-1	0	93%	Triclinic	C1 (1)
Yes	Blue	Crema orientada.raw #1	PDF 00-058-2035	Muscovite-2M1	KAl ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-1	0	7%	Monoclinic	C2/c (15)

Tabla 3.2. Componentes de la arcilla crema orientada.

La Kaolinita pertenece al grupo Caolín, el cual tiene una composición $Al_3Si_4O_{10}(OH)_8$, con una capa tetraédrica ocupada por Si^{4+} y una octaédrica ocupada por Al^{3+} , se trata por tanto de minerales dioctaédricos que apenas presentan sustituciones isomórficas, aunque se diferencian varias especies en función del grado de desorden en el apilamiento de las capas.

La Kaolinita cuando está bien ordenada aparece formando columnas pseudo hexagonales, con un espesor de 7Å. Esta formación se puede apreciar en la Figura 3.3.

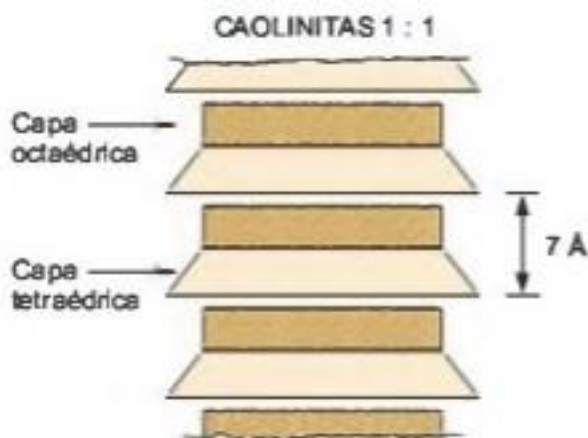


Figura 3.3. Estructura de la Kaolinita (Gonzales de Vallejo).

En la Figura 3.4 se muestra la Kaolinita vista desde el microscopio electrónico.

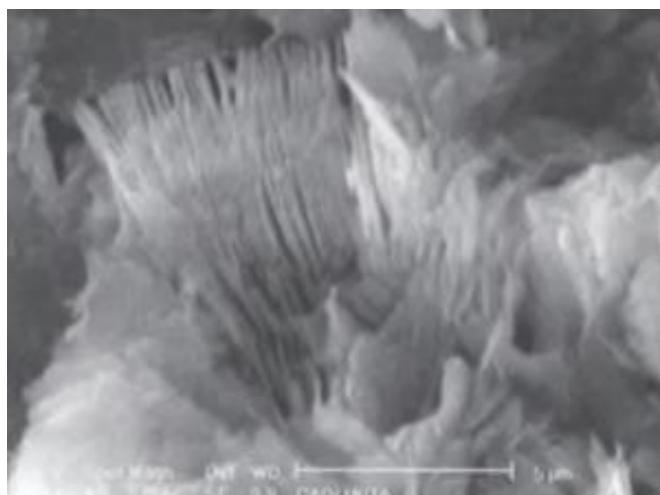


Figura 3.4. Kaolinita al microscopio electrónico (Gonzales de Vallejo).

En cuanto a las propiedades físico – químicas de la Kaolinita posee una baja capacidad de cambio catiónico y una baja superficie específica. Estas propiedades las podemos apreciar en la Tabla 3.3 donde también se aprecia las mismas propiedades para otros minerales.

La capacidad de cambio catiónico es la suma de los cationes que puede absorber un mineral, mientras que la superficie específica es el área de la superficie por unidad de masa, diferenciándose una superficie externa donde se producen las interacciones relacionadas con las cargas superficiales y con los bordes de las partículas, y la superficie interna donde tienen lugar los cambios interlaminares.

Mineral	Capacidad de cambio catiónico meq/100 g	Superficie específica (m ² /g)		
		Externa	Interna	Total
Esmectita	80-150	50	750	800
Ilita	10-40	25	2	27
Caolinita	1-10	15	0	15

Tabla 3.3. Propiedades físico – químicas de la Kaolinita (Gonzales de Vallejo).

La cantidad de agua absorbida por los minerales de la arcilla depende de la capacidad de cambio catiónico y de la superficie específica. Las moléculas se unen a la superficie de las partículas por enlaces dipolares que favorecen la agrupación de las partículas rodeándolas de una película de agua. La debilidad de los enlaces dipolares permite el desplazamiento de las partículas cuando se aplica una presión.

En cuanto a las propiedades geotécnicas y composición mineralógica, como ya sabemos las arcillas son materiales geotécnicamente problemáticos al depender su comportamiento de la composición mineralógica y de las condiciones geoquímicas y ambientales del medio.

En la Figura 3.5 se muestra la posición de distintos tipos de arcillas en la carta de plasticidad de Casagrande. Las plasticidades más bajas corresponden a las kaolinitas y las más altas a las esmectitas, siendo las montmorillonitas las más elevadas dentro de este grupo.

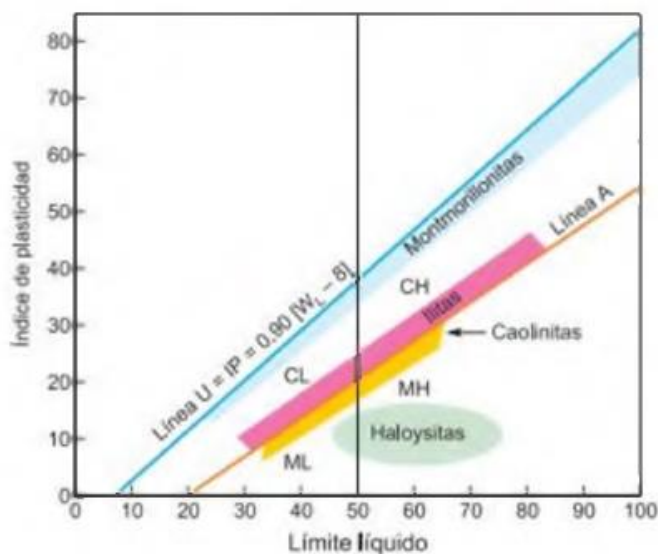


Figura 3.5. Influencia de la composición mineralógica en la plasticidad (Gonzales de Vallejo).

En cuanto a la resistencia de los suelos arcillosos influye el contenido en arcilla, como el tipo de mineral predominante. La resistencia al corte disminuye a medida que aumenta el contenido en arcilla, como se puede observar en la Figura 3.6.

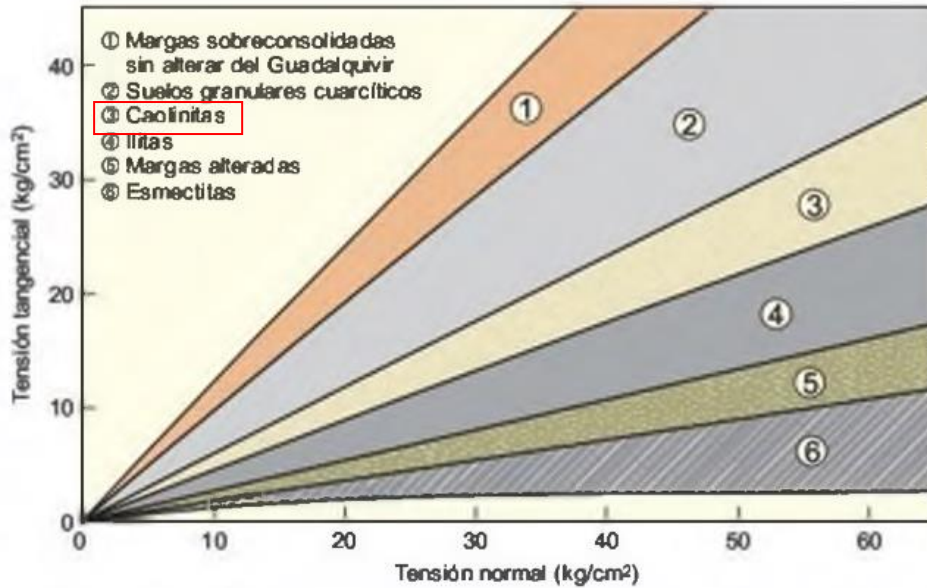


Figura 3.6. Influencia de la mineralogía en la resistencia (Gonzales de Vallejo).

La capacidad de adsorción de agua en los bordes laminares y zonas interlaminares da lugar a los cambios de volumen en las arcillas. En la Figura 3.7 se puede observar que la Kaolinita en un primer momento se hincha pero que con el transcurso del tiempo no aumenta ese hinchamiento.

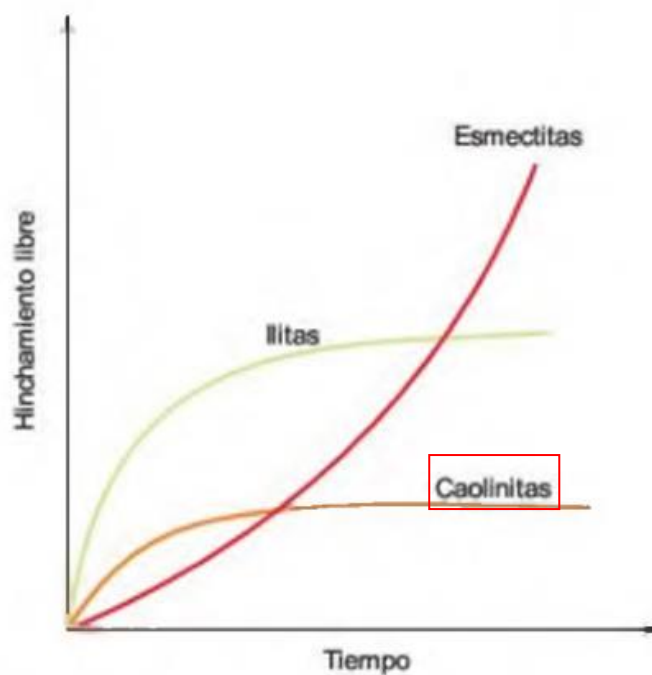


Figura 3.7. Cambio de volumen en función de la composición mineralógica (Gonzales de Vallejo).

También se debe destacar que la composición mineralógica influye en el grado de compresibilidad y en el índice de poros, en la Figura 3.8 se muestra la tendencia de varias arcillas, siendo las más compresibles las esmeclitas y las menos compresibles las kaolinitas. En cuanto al índice de poros observamos que las kaolinitas es el tipo de arcillas que menor índice de poros presenta conforme aumenta la presión.

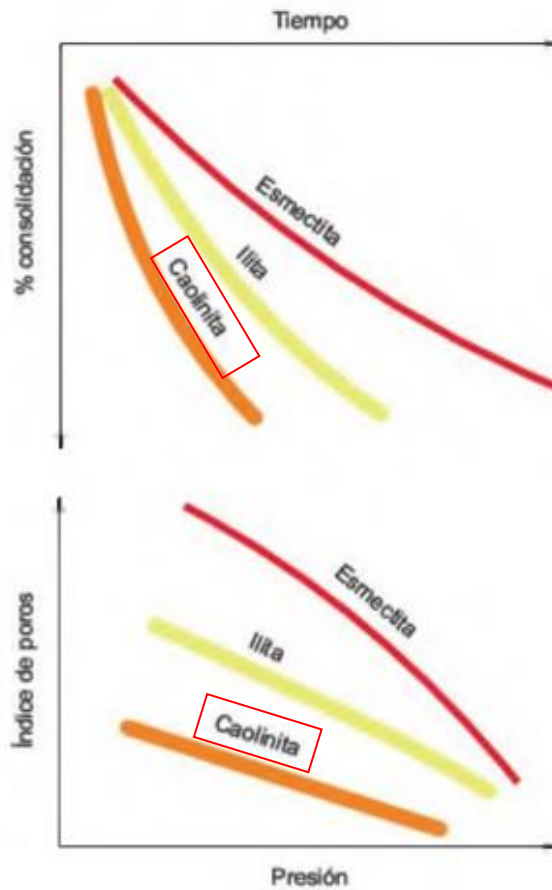


Figura 3.8. Influencia de la composición mineralógica en la compresibilidad (Gonzales de Vallejo).

3.2 Ensayos

Se han realizado dos ensayos el consolidado – no drenado (CU) y el consolidado – drenado (CD).

3.2.1 Ensayo consolidado – no drenado (CU)

En la Tabla 3.4 se muestra la información general del ensayo 1.

Información general acerca del ensayo	
Ensayo nº	1
Tipo de ensayo	Consolidado - no drenado(CU)
Localización	Laboratorio Geotécnica UPCT

Tabla 3.4. Información general del ensayo 1.

En la Tabla 3.5 se pueden ver los datos a partir de los cuales se van a realizar todos los cálculos del ensayo 1.

CU1Kg		
v	1	mm/min
Desplazamiento antes de consolidar (CH2)	4,482	mm
Desplazamiento después de consolidar(CH2)	3,579	mm
Asiento por consolidación (CH2)	-0,903	mm
Desplazamiento (CH5)	4,269	mm
Carga(CH1)	0,016	KN
Pesa(1Kg*10 del brazo multiplicador)	10	Kg
Lado	0,06	m
Superficie	0,0036	m2
Tensión	27,25	Kpa
Espesor placa porosa	5	mm
2*Placa porosa	10	mm
Placa base	6	mm
Placa ranurada	3	mm
2*Placa ranurada	6	mm
Altura caja	50	mm
Camino drenante(H)	28	mm
Lado interior caja (L1)	60	mm
Lado interior caja (L2)	60	mm

Tabla 3.5. Datos de partida del ensayo 1.

En la Tabla 3.6 se encuentran los volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 1.

Volúmenes			Descripción
V1	100,8	cm3	Volumen muestra en célula
V2	97,5492	cm3	Volumen muestra en célula tras consolidar

Tabla 3.6. Volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 1.

En la Tabla 3.7 se encuentran las diferentes masas calculadas para el ensayo 1.

Masas			Descripción
W1	2412	g	Célula+4 placas+ base+tornillos
W2	2575	g	Célula con muestra puesta
W3	2587	g	Célula con muestra al acabar ensayo
W4	18,72	g	Masa de una muestra de la arcilla preparada húmeda
W5	13,09	g	W4 tras 24 horas de estufa
W6	34,15	g	Masa de una muestra de la arcilla una vez ensayada, de la que hay en la célula
W7	24,02	g	W6 tras 24 horas de estufa
W8	163	g	Masa total=W2-W1=W9+W10
W9	49,02	g	Masa de agua
W10	113,98	g	Masa de solido=Masa total - Masa de agua=W8-W9

Tabla 3.7. Masas para el ensayo 1.

En la Tabla 3.8 se muestran los resultados de calcular las densidades aparentes, seca e índice de poros, para las situaciones iniciales y finales del ensayo 1.

Cálculos		
pa (inicial)	1,62	g/cm ³
pa (final)	1,79	g/cm ³
Gs	2,35	g/cm ³
Winicial	43,01	%
Wfinal	42,17	%
eo	1,08	Ad.
ef	1,01	Ad.
pd (inicial)	1,13	g/cm ³
pd (final)	1,17	g/cm ³

Tabla 3.8. Parámetros calculados para el ensayo 1.

En la Figura 3.9 se representa la tensión frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 1.

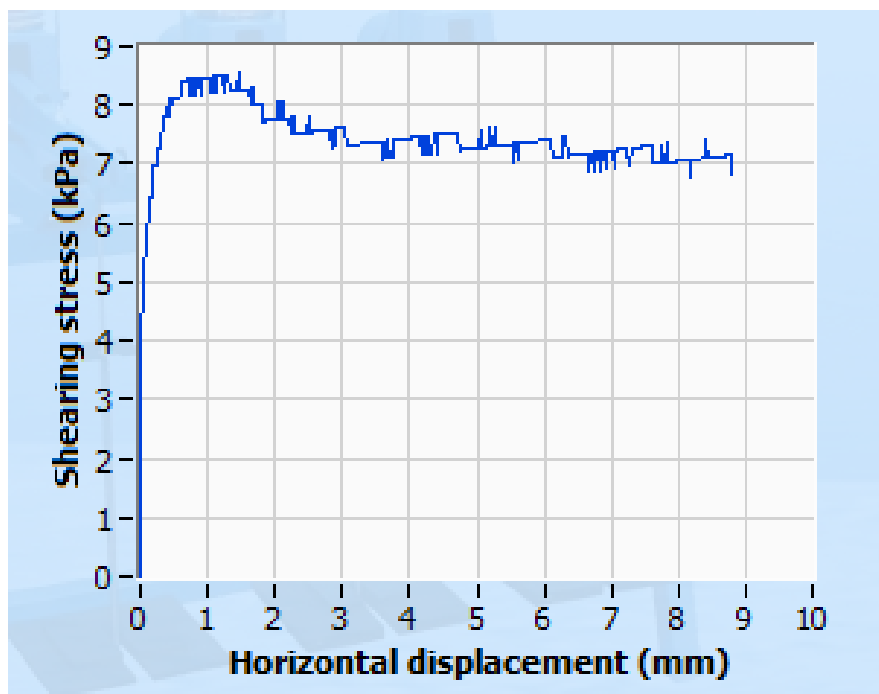


Figura 3.9. Tensión Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 1.

En la Figura 3.10 se representa el asentamiento frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 1.

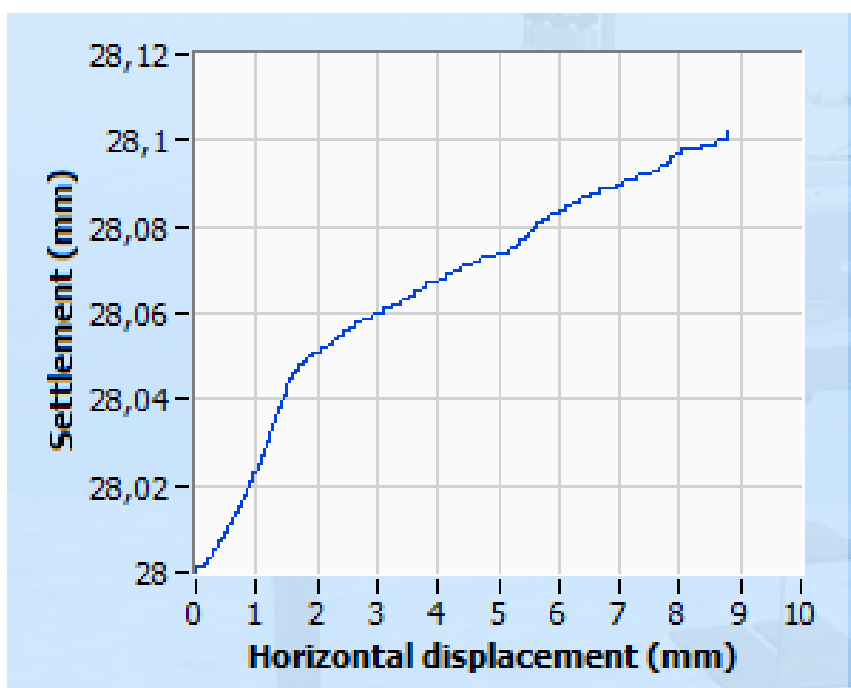


Figura 3.10. Asentamiento Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 1.

En la Tabla 3.9 se muestra la información general del ensayo 2.

Información general acerca del ensayo	
Ensayo nº	2
Tipo de ensayo	Consolidado - no drenado (CU)
Localización	Laboratorio Geotécnica UPCT

Tabla 3.9. Información general del ensayo 2.

En la Tabla 3.10 se pueden ver los datos a partir de los cuales se van a realizar todos los cálculos del ensayo 2.

CU2Kg		
v	1	mm/min
Desplazamiento antes de consolidar (CH2)	3,688	mm
Desplazamiento después de consolidar(CH2)	1,2	mm
Asiento por consolidación (CH2)	-2,488	mm
Desplazamiento (CH5)	4,279	mm
Carga(CH1)	0,019	KN
Pesa(2Kg*10 del brazo multiplicador)	20	Kg
Lado	0,06	m
Superficie	0,0036	m2
Tensión	54,5	Kpa
Espesor placa porosa	5	mm
2*Placa porosa	10	mm
Placa base	6	mm
Placa ranurada	3	mm
2*Placa ranurada	6	mm
Altura caja	50	mm
Camino drenante(H)	28	mm
Lado interior caja (L1)	60	mm
Lado interior caja (L2)	60	mm

Tabla 3.10. Datos de partida del ensayo 2.

En la Tabla 3.11 se encuentran los volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 2.

Volúmenes			Descripción
V1	100,8	cm3	Volumen muestra en célula
V2	91,8432	cm3	Volumen muestra en célula tras consolidar

Tabla 3.11. Volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 2.

En la Tabla 3.12 se encuentran las diferentes masas calculadas para el ensayo 2.

Masas			Descripción
W1	2424	g	Célula+4 placas+ base+tornillos
W2	2576	g	Célula con muestra puesta
W3	2577	g	Célula con muestra al acabar ensayo
W4	9,86	g	Masa de una muestra de la arcilla preparada húmeda
W5	6,94	g	W4 tras 24 horas de estufa
W6	18,5	g	Masa de una muestra de la arcilla una vez ensayada, de la que hay en la célula
W7	13,36	g	W6 tras 24 horas de estufa
W8	152	g	Masa total=W2-W1=W9+W10
W9	45,01	g	Masa de agua
W10	106,99	g	Masa de solido=Masa total - Masa de agua=W8-W9

Tabla 3.12. Masas para el ensayo 2.

En la Tabla 3.13 se muestran los resultados de calcular las densidades aparentes, seca e índice de poros, para las situaciones iniciales y finales del ensayo 2.

Cálculos		
ρ_a (inicial)	1,51	g/cm ³
ρ_a (final)	1,67	g/cm ³
G _s	2,35	g/cm ³
W _{inicial}	42,07	%
W _{final}	38,47	%
e _o	1,21	Ad.
e _f	1,02	Ad.
ρ_d (inicial)	1,06	g/cm ³
ρ_d (final)	1,16	g/cm ³

Tabla 3.13. Parámetros calculados para el ensayo 2.

En la Figura 3.11 se representa la tensión frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 2.

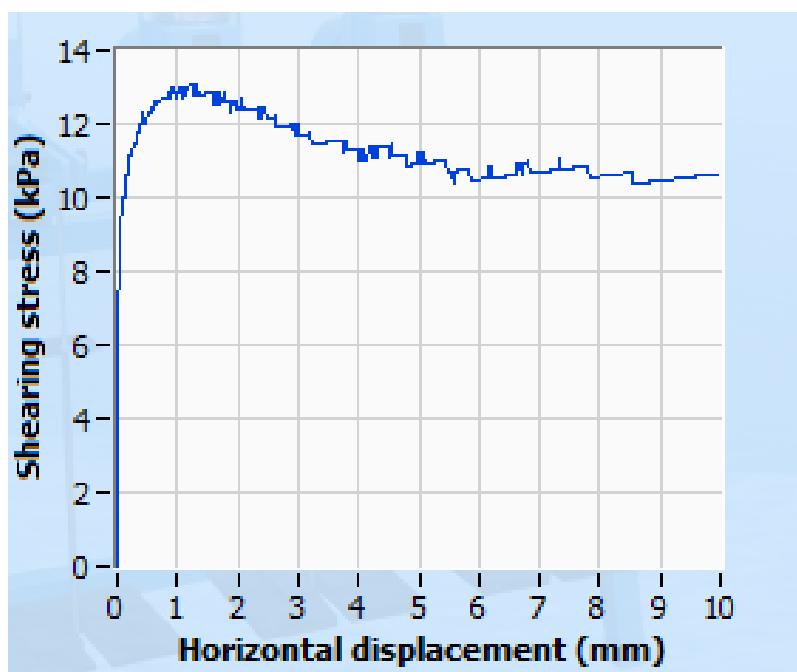


Figura 3.11. Tensión Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 2.

En la Figura 3.12 se representa el asentamiento frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 2.

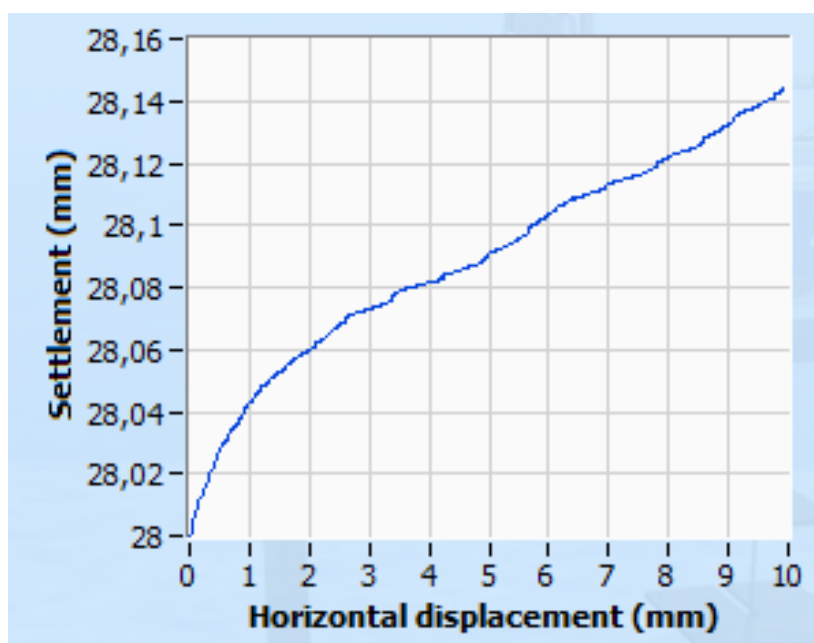


Figura 3.12. Asentamiento Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 2.

En la Tabla 3.14 se muestra la información general del ensayo 3.

Información general acerca del ensayo	
Ensayo nº	3
Tipo de ensayo	Consolidado - no drenado (CU)
Localización	Laboratorio Geotécnica UPCT

Tabla 3.14. Información general del ensayo 3.

En la Tabla 3.15 se pueden ver los datos a partir de los cuales se van a realizar todos los cálculos del ensayo 3.

CU4Kg		
v	1	mm/min
Desplazamiento antes de consolidar (CH2)	8,789	mm
Desplazamiento después de consolidar(CH2)	4,415	mm
Asiento por consolidación (CH2)	-4,374	mm
Desplazamiento (CH5)	4,631	mm
Carga(CH1)	0,011	KN
Pesa(4Kg*10 del brazo multiplicador)	40	Kg
Lado	0,06	m
Superficie	0,0036	m ²
Tensión	109	Kpa
Espesor placa porosa	5	mm
2*Placa porosa	10	mm
Placa base	6	mm
Placa ranurada	3	mm
2*Placa ranurada	6	mm
Altura caja	50	mm
Camino drenante(H)	28	mm
Lado interior caja (L1)	60	mm
Lado interior caja (L2)	60	mm

Tabla 3.15. Datos de partida del ensayo 3.

En la Tabla 3.16 se encuentran los volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 3.

Volúmenes			Descripción
V1	100,8	cm ³	Volumen muestra en célula
V2	85,0536	cm ³	Volumen muestra en célula tras consolidar

Tabla 3.16. Volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 3.

En la Tabla 3.17 se encuentran las diferentes masas calculadas para el ensayo 3.

Masas			Descripción
W1	2412	g	Célula+4 placas+ base+tornillos
W2	2572	g	Célula con muestra puesta
W3	2566	g	Célula con muestra al acabar ensayo
W4	15,039	g	Masa de una muestra de la arcilla preparada húmeda
W5	9,88	g	W4 tras 24 horas de estufa
W6	9,9	g	Masa de una muestra de la arcilla una vez ensayada, de la que hay en la célula
W7	6,95	g	W6 tras 24 horas de estufa
W8	160	g	Masa total=W2-W1=W9+W10
W9	54,89	g	Masa de agua
W10	105,11	g	Masa de solido=Masa total - Masa de agua=W8-W9

Tabla 3.17. Masas para el ensayo 3.

En la Tabla 3.18 se muestran los resultados de calcular las densidades aparentes, seca e índice de poros, para las situaciones iniciales y finales del ensayo 3.

Cálculos		
ρ_a (inicial)	1,59	g/cm ³
ρ_a (final)	1,81	g/cm ³
Gs	2,35	g/cm ³
W _{inicial}	52,22	%
W _{final}	42,45	%
e _o	1,25	Ad.
e _f	0,90	Ad.
ρ_d (inicial)	1,04	g/cm ³
ρ_d (final)	1,24	g/cm ³

Tabla 3.18. Parámetros calculados para el ensayo 3.

En la Figura 3.13 se representa la tensión frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 3.

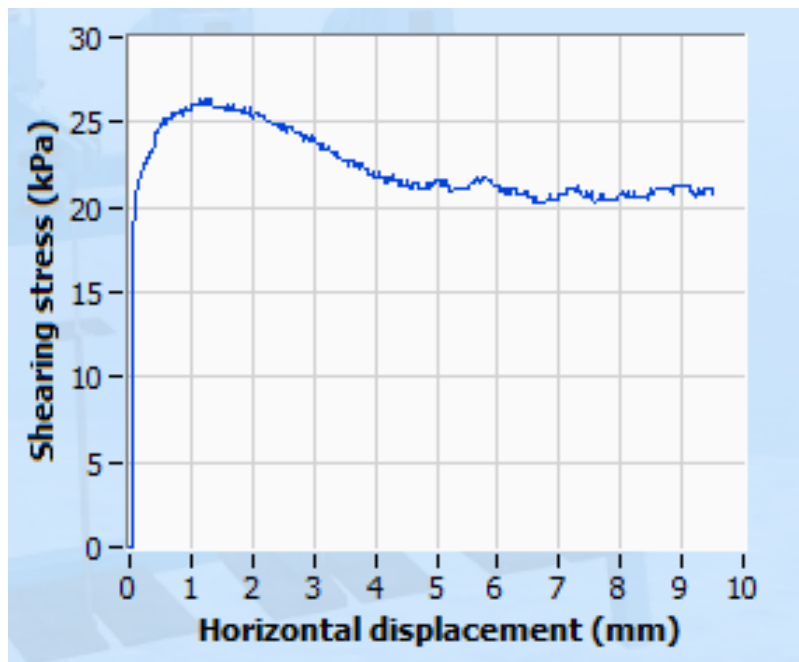


Figura 3.13. Tensión Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 3.

En la Figura 3.14 se representa el asentamiento frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 3.

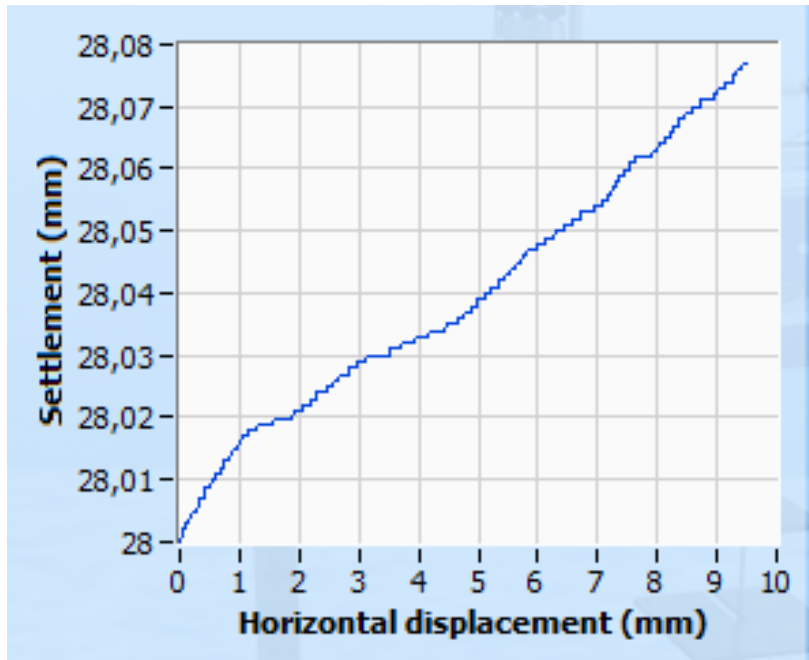


Figura 3.14. Asentamiento Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 3.

En la figura 3.15 se representan las tres gráficas “Tensión Vs Desplazamiento horizontal” correspondientes a los ensayos 1, 2 y 3.

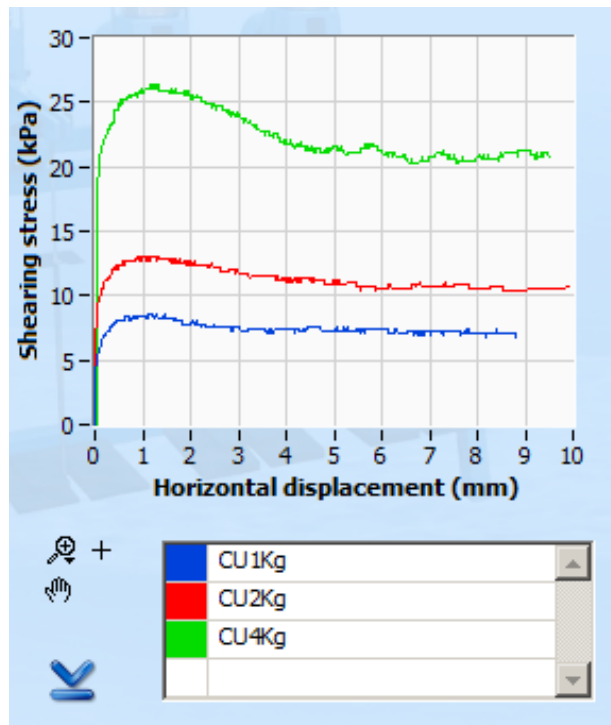


Figura 3.15. Tensión Vs Desplazamiento horizontal para los ensayos 1, 2 y 3.

En la Figura 3.16 se muestran las envolventes de rotura para el ensayo consolidado – no drenado (CU), que en nuestro caso son los ensayos 1, 2 y 3.

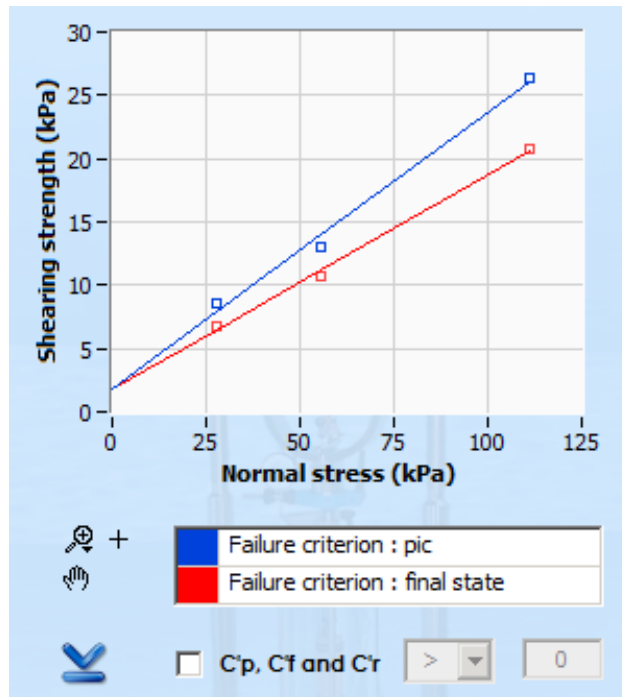


Figura 3.16. Envolventes de rotura del ensayo consolidado – no drenado(CU).

En la figura 3.17 se representan las tres gráficas “Asentamiento Vs Desplazamiento horizontal” correspondientes a los ensayos 1, 2 y 3.

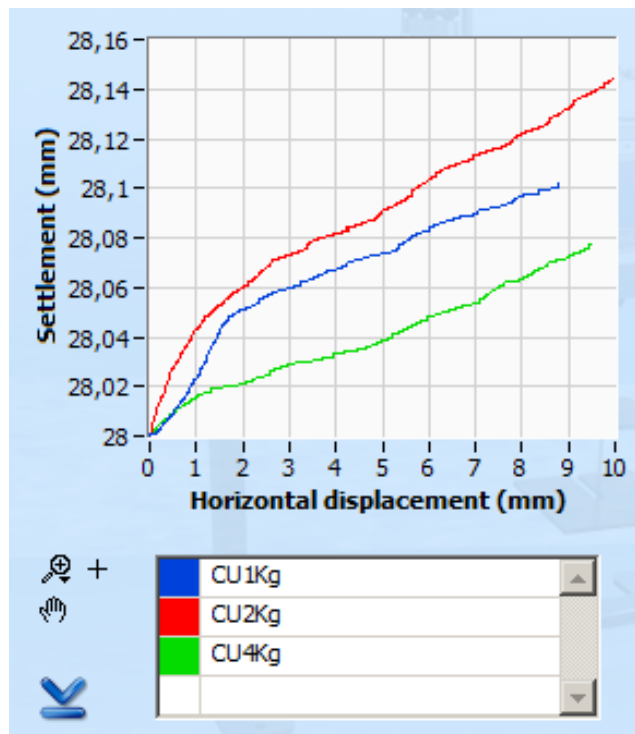


Figura 3.17. Asentamiento Vs Desplazamiento horizontal para los ensayos 1, 2 y 3.

3.2.2 Ensayo consolidado – drenado (CD)

En la Tabla 3.19 se muestra la información general del ensayo 4.

Información general acerca del ensayo	
Ensayo nº	4
Tipo de ensayo	Consolidado - drenado (CD)
Localización	Laboratorio Geotécnica UPCT

Tabla 3.19. Información general del ensayo 4.

En la Tabla 3.20 se pueden ver los datos a partir de los cuales se van a realizar todos los cálculos del ensayo 4.

CD1Kg		
v	0,00390225	mm/min
Desplazamiento antes de consolidar (CH2)	3,465	mm
Desplazamiento después de consolidar(CH2)	2,76	mm
Asiento por consolidación (CH2)	-0,705	mm
Desplazamiento (CH5)	5,944	mm
Carga(CH1)	0,011	KN
Pesa(1Kg*10 del brazo multiplicador)	10	Kg
Lado	0,06	m
Superficie	0,0036	m ²
Tensión	27,25	Kpa
Espesor placa porosa	5	mm
2*Placa porosa	10	mm
Placa base	6	mm
Placa ranurada	3	mm
2*Placa ranurada	6	mm
Altura caja	50	mm
Camino drenante(H)	28	mm
Lado interior caja (L1)	60	mm
Lado interior caja (L2)	60	mm

Tabla 3.20. Datos de partida del ensayo 4.

En la Tabla 3.21 se encuentran los volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 4.

Volúmenes			Descripción
V1	100,8	cm ³	Volumen muestra en célula
V2	98,262	cm ³	Volumen muestra en célula tras consolidar

Tabla 3.21. Volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 4.

En la Tabla 3.22 se encuentran las diferentes masas calculadas para el ensayo 4.

Masas			Descripción
W1	2427	g	Célula+4 placas+ base+tornillos
W2	2577	g	Célula con muestra puesta
W3	2580	g	Célula con muestra al acabar ensayo
W4	11,48	g	Masa de una muestra de la arcilla preparada húmeda
W5	7,24	g	W4 tras 24 horas de estufa
W6	15,57	g	Masa de una muestra de la arcilla una vez ensayada, de la que hay en la célula
W7	10,03	g	W6 tras 24 horas de estufa
W8	150	g	Masa total=W2-W1=W9+W10
W9	55,40	g	Masa de agua

Tabla 3.22. Masas para el ensayo 4.

En la Tabla 3.23 se muestran los resultados de calcular las densidades aparentes, seca e índice de poros, para las situaciones iniciales y finales del ensayo 4.

Cálculos		
ρ_a (inicial)	1,49	g/cm ³
ρ_a (final)	1,56	g/cm ³
Gs	2,35	g/cm ³
W _{inicial}	58,56	%
W _{final}	55,23	%
eo	1,50	Ad.
ef	1,44	Ad.
ρ_d (inicial)	0,94	g/cm ³
ρ_d (final)	0,96	g/cm ³

Tabla 3.23. Parámetros calculados para el ensayo 4.

En la Figura 3.18 se representa la tensión frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 1.

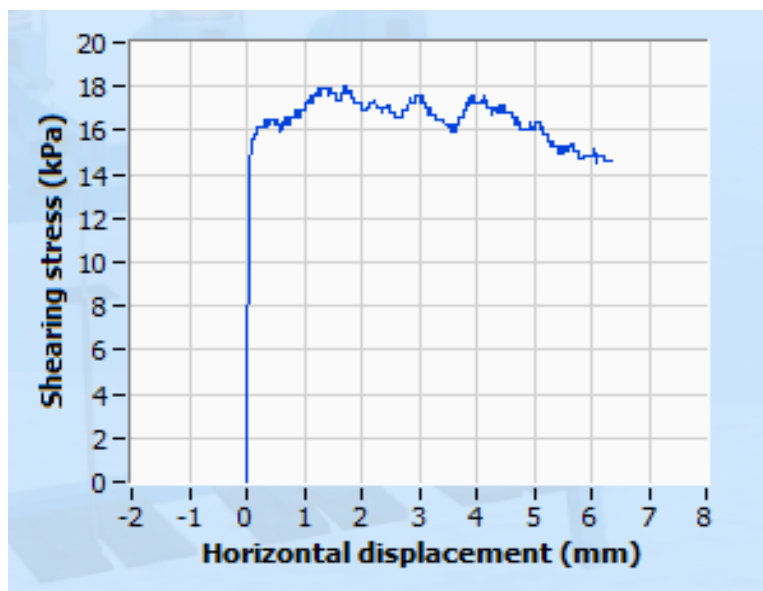


Figura 3.18. Gráfica Tensión Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 4.

En la Figura 3.19 se representa el asentamiento frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 4.

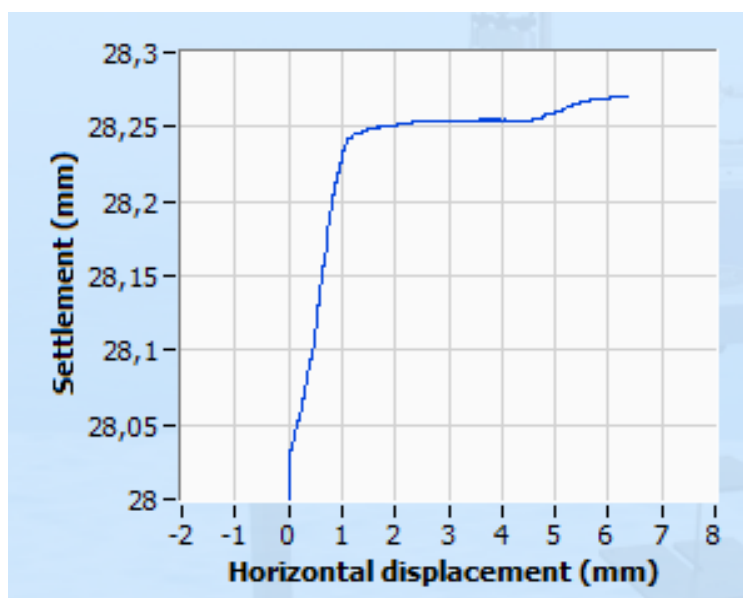


Figura 3.19. Asentamiento Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 4.

En la Tabla 3.24 se muestra la información general del ensayo 5.

Información general acerca del ensayo	
Ensayo nº	5
Tipo de ensayo	Consolidado - drenado (CD)
Localización	Laboratorio Geotécnica UPCT

Tabla 3.24. Información general del ensayo 5.

En la Tabla 3.25 se pueden ver los datos a partir de los cuales se van a realizar todos los cálculos del ensayo 5.

CD2Kg		
v	0,00390225	mm/min
Desplazamiento antes de consolidar (CH2)	4,462	mm
Desplazamiento después de consolidar(CH2)	1,47	mm
Asiento por consolidación (CH2)	-2,992	mm
Desplazamiento (CH5)	5,03	mm
Carga(CH1)	0,02	KN
Pesa(2Kg*10 del brazo multiplicador)	20	Kg
Lado	0,06	m
Superficie	0,0036	m2
Tensión	54,5	Kpa
Espesor placa porosa	5	mm
2*Placa porosa	10	mm
Placa base	6	mm
Placa ranurada	3	mm
2*Placa ranurada	6	mm
Altura caja	50	mm
Camino drenante(H)	28	mm
Lado interior caja (L1)	60	mm
Lado interior caja (L2)	60	mm

Tabla 3.25. Datos de partida del ensayo 5.

En la Tabla 3.26 se encuentran los volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 5.

Volúmenes			Descripción
V1	100,8	cm3	Volumen muestra en célula
V2	90,0288	cm3	Volumen muestra en célula tras consolidar

Tabla 3.26. Volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 5.

En la Tabla 3.27 se encuentran las diferentes masas calculadas para el ensayo 5.

Masas			Descripción
W1	2425	g	Célula+4 placas+ base+tornillos
W2	2574	g	Célula con muestra puesta
W3	2575	g	Célula con muestra al acabar ensayo
W4	13,26	g	Masa de una muestra de la arcilla preparada húmeda
W5	8,67	g	W4 tras 24 horas de estufa
W6	12,28	g	Masa de una muestra de la arcilla una vez ensayada, de la que hay en la célula
W7	8,63	g	W6 tras 24 horas de estufa
W8	149	g	Masa total=W2-W1=W9+W10
W9	51,58	g	Masa de agua
W10	97,42	g	Masa de solido=Masa total - Masa de agua=W8-W9

Tabla 3.27. Masas para el ensayo 5.

En la Tabla 3.28 se muestran los resultados de calcular las densidades aparentes, seca e índice de poros, para las situaciones iniciales y finales del ensayo 5.

Cálculos		
ρ_a (inicial)	1,48	g/cm ³
ρ_a (final)	1,67	g/cm ³
Gs	2,35	g/cm ³
Winicial	52,94	%
Wfinal	42,29	%
eo	1,43	Ad.
ef	1,17	Ad.
ρ_d (inicial)	0,97	g/cm ³
ρ_d (final)	1,08	g/cm ³

Tabla 3.28. Parámetros calculados para el ensayo 5.

En la Figura 3.20 se representa la tensión frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 5.

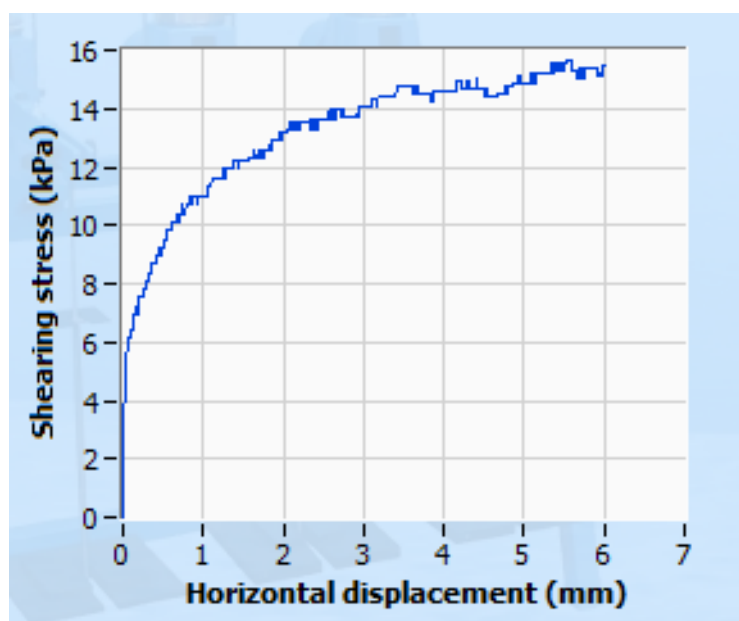


Figura 3.20. Gráfica Tensión Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 5.

En la Figura 3.21 se representa el asentamiento frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 5.

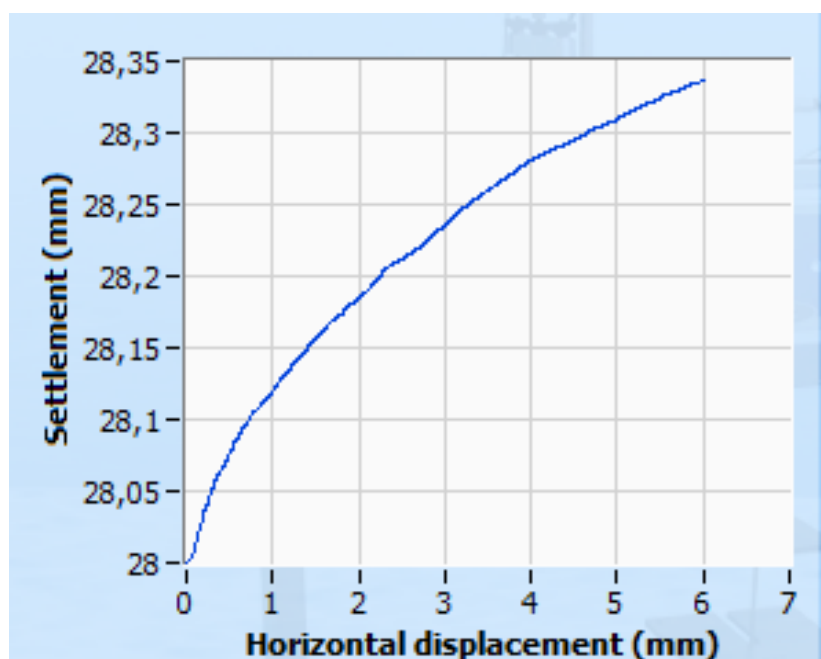


Figura 3.21. Asentamiento Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 5.

En la Tabla 3.29 se muestra la información general del ensayo 6.

Información general acerca del ensayo	
Ensayo nº	6
Tipo de ensayo	Consolidado - drenado (CD)
Localización	Laboratorio Geotécnica UPCT

Tabla 3.29. Información general del ensayo 6.

En la Tabla 3.30 se pueden ver los datos a partir de los cuales se van a realizar todos los cálculos del ensayo 6.

CD4Kg		
v	0,00390225	mm/min
Desplazamiento antes de consolidar (CH2)	8,46	mm
Desplazamiento después de consolidar(CH2)	4,567	mm
Asiento por consolidación (CH2)	-3,893	mm
Desplazamiento (CH5)	4,55	mm
Carga(CH1)	0,013	KN
Pesa(4Kg*10 del brazo multiplicador)	40	Kg
Lado	0,06	m
Superficie	0,0036	m2
Tensión	109	Kpa
Espesor placa porosa	5	mm
2*Placa porosa	10	mm
Placa base	6	mm
Placa ranurada	3	mm
2*Placa ranurada	6	mm
Altura caja	50	mm
Camino drenante(H)	28	mm
Lado interior caja (L1)	60	mm
Lado interior caja (L2)	60	mm

Tabla 3.30. Datos de partida del ensayo 6.

En la Tabla 3.31 se encuentran los volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 6.

Volúmenes			Descripción
V1	100,8	cm3	Volumen muestra en célula
V2	86,7852	cm3	Volumen muestra en célula tras consolidar

Tabla 3.31. Volúmenes antes y después de consolidar para el ensayo 6.

En la Tabla 3.32 se encuentran las diferentes masas calculadas para el ensayo 6.

Masas			Descripción
W1	2426	g	Célula+4 placas+ base+tornillos
W2	2574	g	Célula con muestra puesta
W3	2579	g	Célula con muestra al acabar ensayo
W4	9,4	g	Masa de una muestra de la arcilla preparada húmeda
W5	5,8	g	W4 tras 24 horas de estufa
W6	15,57	g	Masa de una muestra de la arcilla una vez ensayada, de la que hay en la célula
W7	10,71	g	W6 tras 24 horas de estufa
W8	148	g	Masa total=W2-W1=W9+W10
W9	56,68	g	Masa de agua
W10	91,32	g	Masa de solido=Masa total - Masa de agua=W8-W9

Tabla 3.32. Masas para el ensayo 6.

En la Tabla 3.33 se muestran los resultados de calcular las densidades aparentes, seca e índice de poros, para las situaciones iniciales y finales del ensayo 6.

Cálculos		
ρ_a (inicial)	1,47	g/cm ³
ρ_a (final)	1,76	g/cm ³
Gs	2,35	g/cm ³
Winicial	62,07	%
Wfinal	45,38	%
eo	1,59	Ad.
ef	1,23	Ad.
ρ_d (inicial)	0,91	g/cm ³
ρ_d (final)	1,05	g/cm ³

Tabla 3.33. Parámetros calculados para el ensayo 6.

En la Figura 3.22 se representa la tensión frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 6.

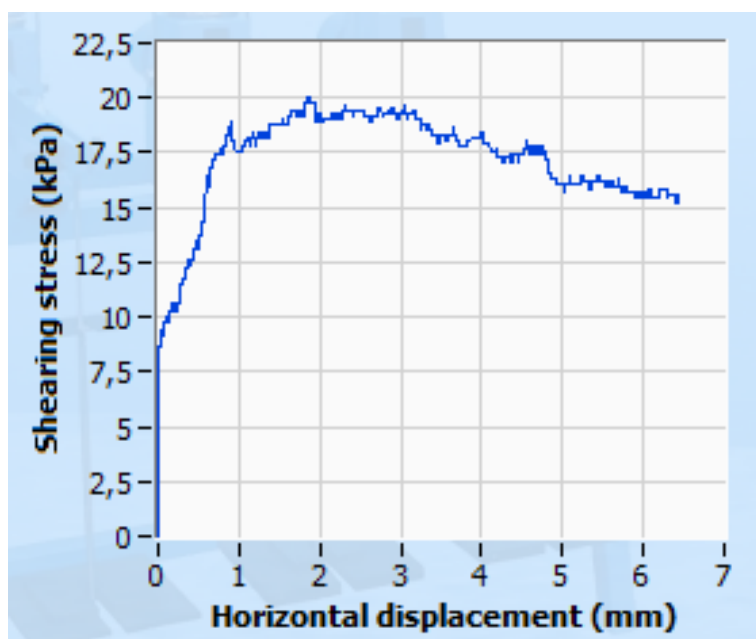


Figura 3.22. Gráfica Tensión Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 6.

En la Figura 3.23 se representa el asentamiento frente al desplazamiento horizontal para el ensayo 6.

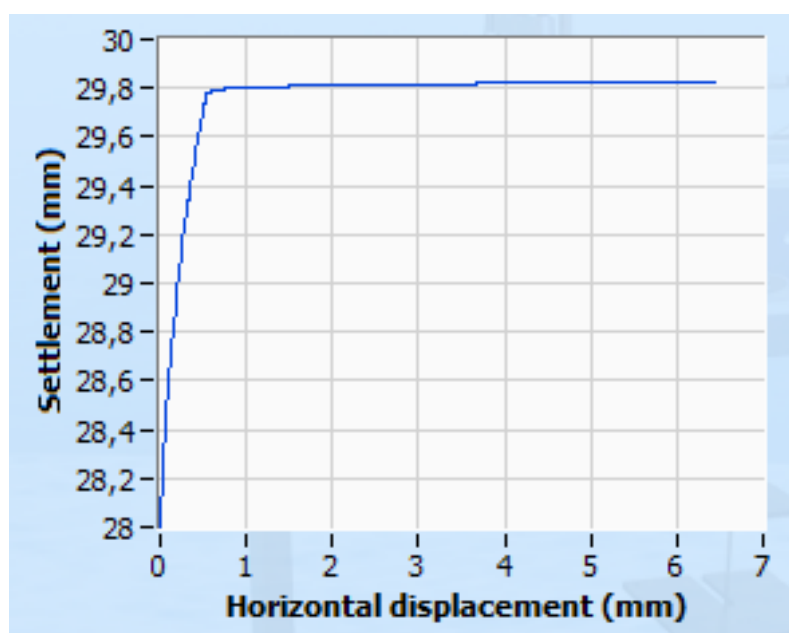


Figura 3.23. Asentamiento Vs Desplazamiento horizontal para el ensayo 6.

En la figura 3.24 se representan las tres gráficas “Tensión Vs Desplazamiento horizontal” correspondientes a los ensayos 4, 5 y 6.

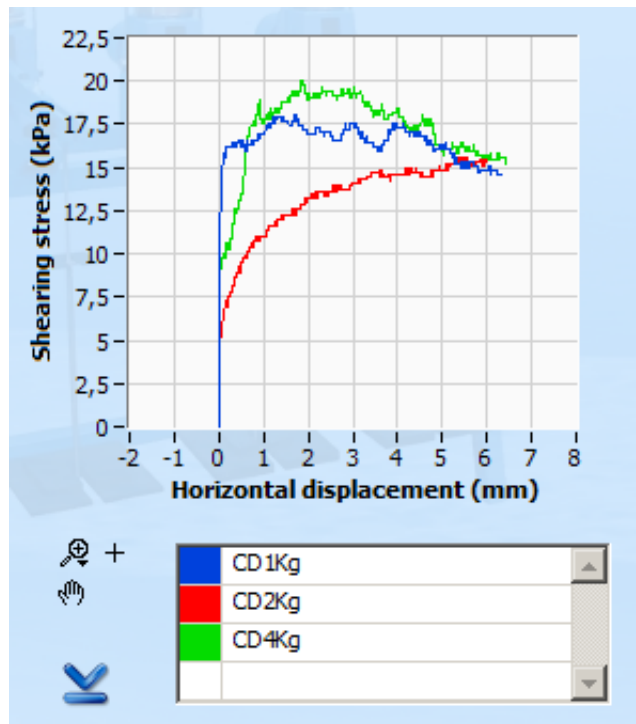


Figura 3.24. Tensión Vs Desplazamiento horizontal para los ensayos 4, 5 y 6.

En la Figura 3.25 se muestran las envolventes de rotura para el ensayo consolidado – drenado (CD), que en nuestro caso son los ensayos 4, 5 y 6.

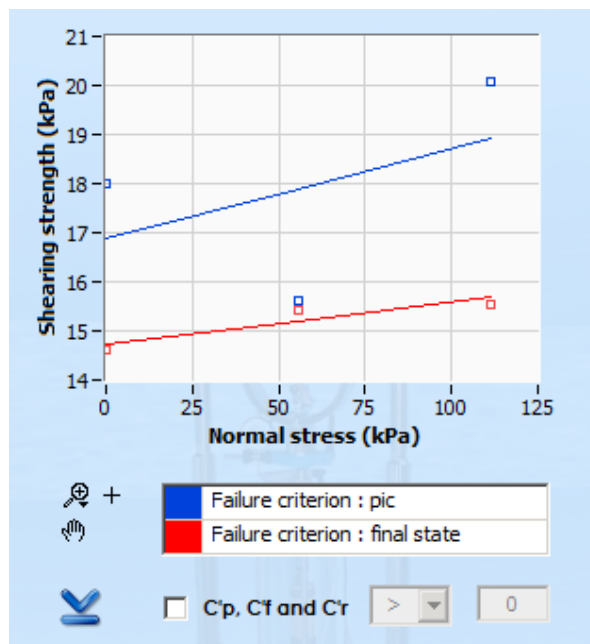


Figura 3.25. Envolventes de rotura del ensayo consolidado – drenado(CD).

En la figura 3.26 se representan las tres gráficas “Asentamiento Vs Desplazamiento horizontal” correspondientes a los ensayos 4, 5 y 6.

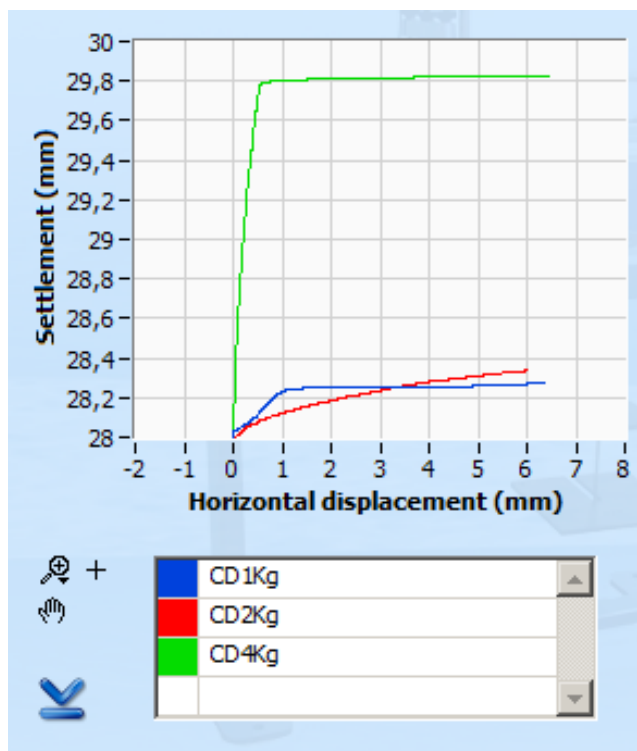


Figura 3.26. Asentamiento Vs Desplazamiento horizontal para los ensayos 4, 5 y 6.

3.3 Discusión de resultados

Se han realizado seis ensayos, tres para consolidado – no drenado (CU) y otros tres para consolidado – drenado (CD), con tres escalones de carga 10 Kg, 20Kg y 40 Kg (teniendo en cuenta el brazo mecánico).

En primer lugar, vamos a discutir los ensayos consolidado – no drenado. En la Figura 3.27 se puede observar que, a mayor tensión normal, mayor valor de resistencia pico. En cada uno de los ensayos hemos obtenido un valor pico y un valor crítico.

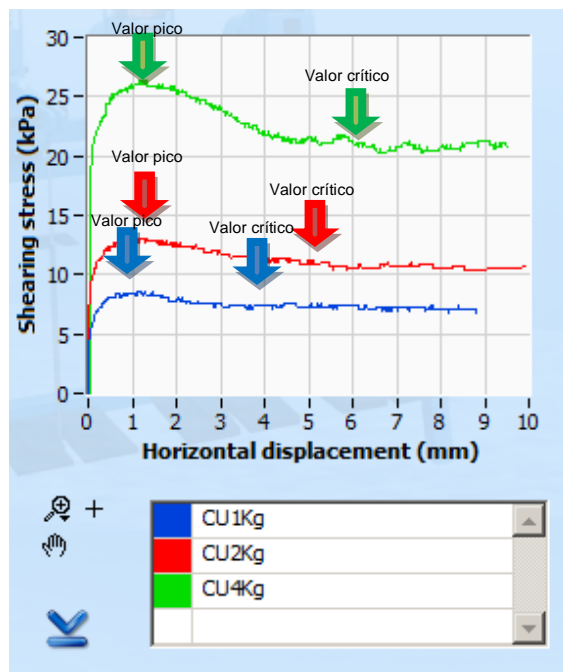


Figura 3.27. Valores pico y críticos de tensión normal para los ensayos 1, 2 y 3.

En la Tabla 3.34 se pueden ver los valores de resistencia pico y crítico.

	$\tau_{f,p}$ (Kpa)	$\tau_{f,f}$ (Kpa)
CU1Kg	8,543	6,834
CU2Kg	13,07	10,65
CU4Kg	26,41	20,79

Tabla 3.34. Resistencias pico y crítico para los ensayos 1, 2 y 3.

En la Figura 3.28 se puede observar las dos envolventes de Mohr, una con valores pico y otra con valores críticos. Se aprecia que ambas envolventes poseen la misma cohesión esto se debe a que al tratarse del ensayo consolidado – no drenado (CU), no se produce drenaje y la cohesión de ambas envolventes es la misma. La envolvente pico la utilizaremos para situaciones donde se nos exijan pequeñas deformaciones y la envolvente de valores críticos en situaciones que requieran factores de seguridad bajos.

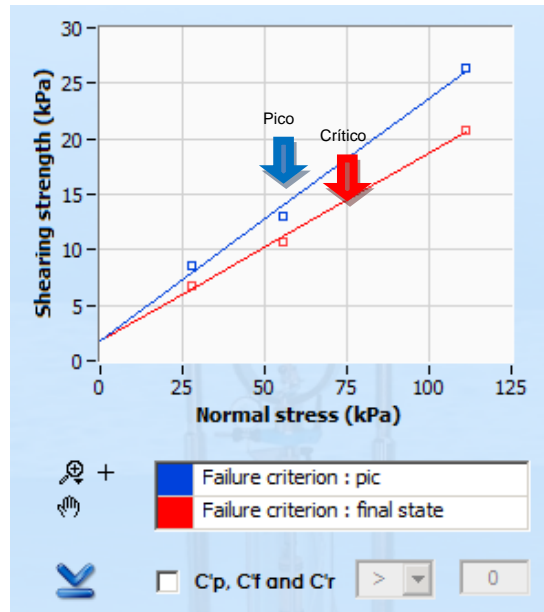


Figura 3.28. Envolventes pico y crítico de rotura del ensayo consolidado – no drenado (CU).

En la Tabla 3.35 se muestran las cohesiones pico y crítica y los ángulos de fricción pico y crítico.

	Cp(Kpa)	Cf(Kpa)	$\phi_p(^{\circ})$	$\phi_f(^{\circ})$
CU	1,87	1,764	12,3	9,628

Tabla 3.35. Cohesión y ángulo de fricción pico y residual para los ensayos 1, 2 y 3.

En la Figura 3.29 se observa el asentamiento para cada uno de los ensayos consolidado - no drenado (CU). La gráfica corrobora que se trata de una arcilla ya que conforme el desplazamiento horizontal avanza, las partículas de arcilla se van cada vez compactando más y la muestra va asentando.



Figura 3.29. Asentamiento para los ensayos 1, 2 y 3.

En la Tabla 3.36 se puede ver los asentamientos para los ensayos 1, 2 y 3.

	Asentamiento(mm)
CU1Kg	0,102
CU2Kg	0,132
CU4Kg	0,069

Tabla 3.36. Asentamientos para los ensayos 1, 2 y 3.

En segundo lugar, vamos a discutir los ensayos consolidado – drenado. En la Figura 3.30 se puede observar que para CD4Kg y CD1Kg si se cumple que a mayor tensión normal mayores valores de resistencia pico. Mientras que para CD2Kg los resultados son anormales, por lo que podemos deducir que el ensayo no se ha realizado de forma correcta. El comportamiento del ensayo CD2Kg parece de una arcilla no consolidada.

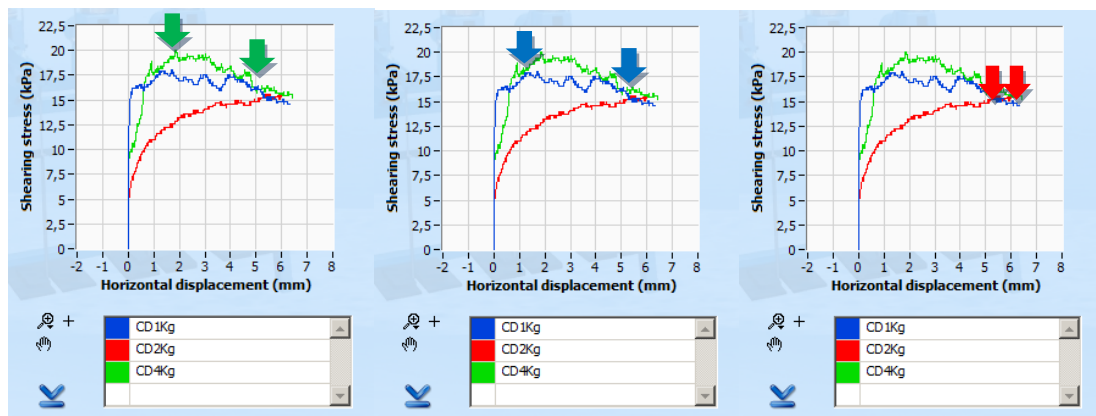


Figura 3.30. Valores pico y críticos de tensión normal para los ensayos 4, 5 y 6.

En la Tabla 3.37 se pueden ver los valores de resistencia pico y crítico.

	$\tau_{f,p}$ (Kpa)	$\tau_{f,f}$ (Kpa)
CD1Kg	18,02	14,6
CD2Kg	15,62	15,43
CD4Kg	20,07	15,56

Tabla 3.37. Resistencias pico y crítico para los ensayos 4, 5 y 6.

En la Figura 31 se puede observar las dos envolventes de Mohr, una con valores pico y otra con valores críticos. Se aprecia que ambas envolventes poseen distinta cohesión esto se debe a que al tratarse del ensayo consolidado –drenado (CD), se produce drenaje y la cohesión de ambas envolventes es distinta. La envolvente pico la utilizaremos para situaciones donde se nos exijan pequeñas deformaciones y la envolvente de valores críticos en situaciones que requieran factores de seguridad bajos.

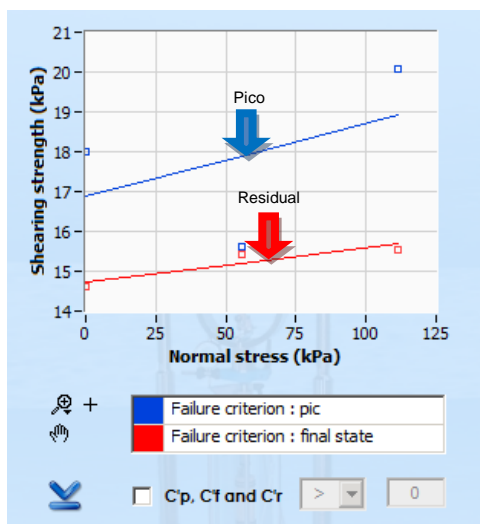


Figura 3.31. Envolventes pico y crítica de rotura del ensayo consolidado –drenado (CD).

En la Tabla 3.38 se muestran las cohesiones pico y crítica y los ángulos de fricción pico y crítico.

	Cp(Kpa)	Cf(Kpa)	φp(°)	φf(°)
CD	16,87	14,72	1,062	0,495

Tabla 3.38. Cohesión y ángulo de fricción pico y residual para los ensayos 4, 5 y 6.

En la Figura 3.32 se observa el asentamiento para cada uno de los ensayos consolidado - drenado (CD). La gráfica corrobora que se trata de una arcilla consolidada drenada ya que conforme el desplazamiento horizontal avanza, las partículas de arcilla se van cada vez compactando mas y la muestra va asentando hasta que llega un momento que no se puede asentar más. El asentamiento en el ensayo CD4Kg es mucho mayor que en los otros ensayos ya que este ensayo la muestra tenia una humedad inicial del 62% frente al 52 y 58 % de los otros ensayos, por lo que al ser más húmeda la muestra asienta más.

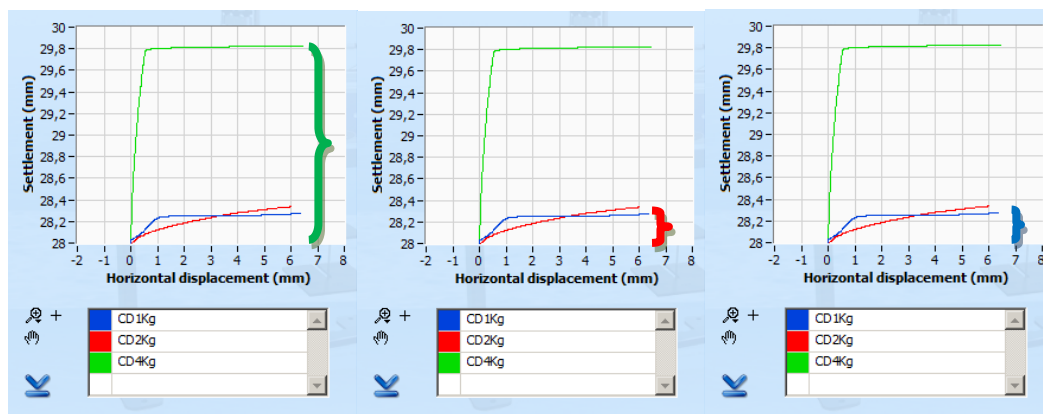


Figura 3.32. Asentamiento para los ensayos 4, 5 y 6.

En la Tabla 3.39 se puede ver los asentamientos para los ensayos 4, 5 y 6.

	Asentamiento(mm)
CD1Kg	0,27
CD2Kg	0,336
CD4Kg	1,828

Tabla 3.39. Asentamientos para los ensayos 4, 5 y 6.

4 Conclusiones

Se han realizado dos tipos de ensayos de corte directo el consolidado – no drenado (CU) y el consolidado – drenado (CD).

El primero CU arroja unos resultados esperables para una arcilla, siendo los valores pico $C_p = 1,87$ Kpa y $\phi_p = 12,3^\circ$ y los críticos $C_c = 1,764$ Kpa y $\phi_c = 9,628^\circ$.

El segundo CD arroja unos resultados esperables para una arcilla, siendo los valores pico $C_p = 16,87$ Kpa y $\phi_p = 1,062^\circ$ y los críticos $C_c = 14,72$ Kpa y $\phi_c = 0,495^\circ$.

Cabe destacar que para la carga de CD2Kg se obtuvo un valor anómalo, que se interpreta por una mala consolidación de la muestra.

Para llevar a cabo los cálculos que se precisaban para programar la velocidad de ejecución del ensayo CD, se realizó un ensayo de consolidación en la arcilla que permitió obtener un C_v de la arcilla de $0.3 \text{ m}^2/\text{a}$. Además se realizó una hoja excel específica para la corrección del área de rotura durante el desplazamiento de la célula de corte.

5 Anexos

ANEXO 1: Cálculo de las velocidades de corte

Ensayo consolidado – drenado (CD).

El ensayo consolidado – drenado (CD) se ha realizado a una velocidad de 0,003494549 mm/min, la cual es una velocidad suficientemente lenta para que no se produzcan presiones intersticiales.

Esta velocidad se ha calculado siguiendo el método logarítmico o de Casagrande, el cual está explicado en la teoría de este trabajo. En este anexo se realizará solo el cálculo matemático de esta velocidad, ya que la parte teoría está explicada en apartados anteriores.

$$H = 0,014 \text{ m}$$

$$C_v = 0,3 \text{ m}^2/\text{año}$$

$$U_f = 0,9$$

$$t_f = \frac{H^2}{2C_v(1 - U_f)} = \frac{0,014^2}{2 * 0,3 * (1 - 0,9)} = 0,003266667 \text{ años}$$

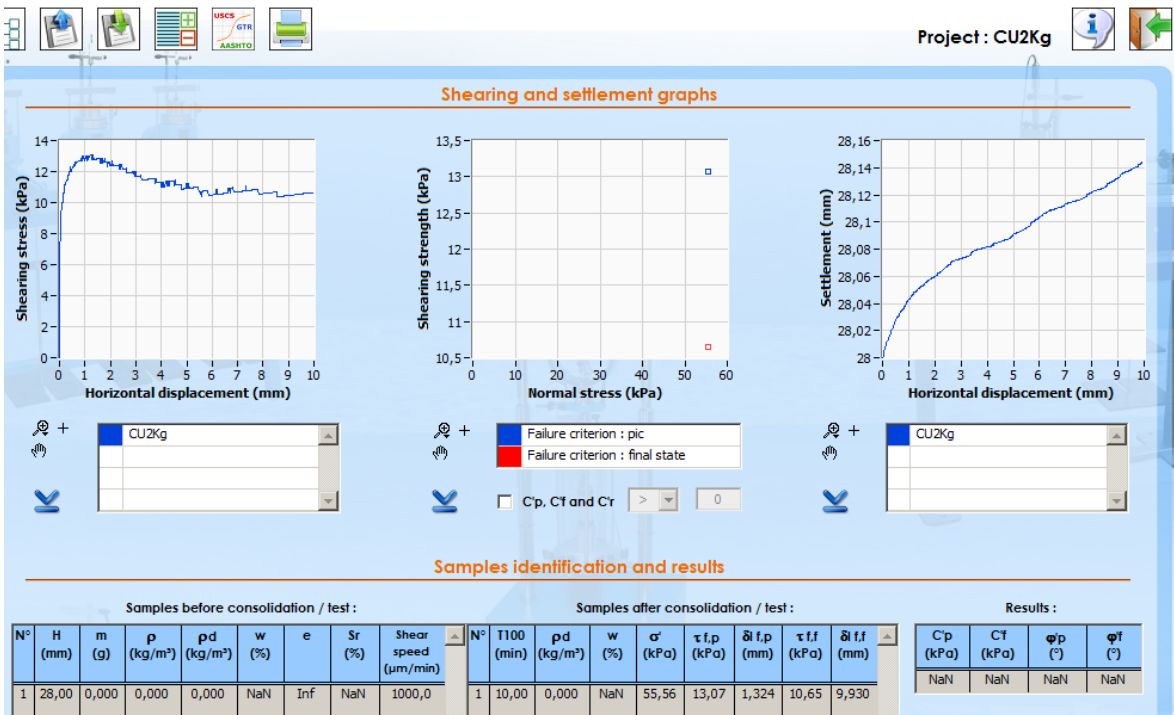
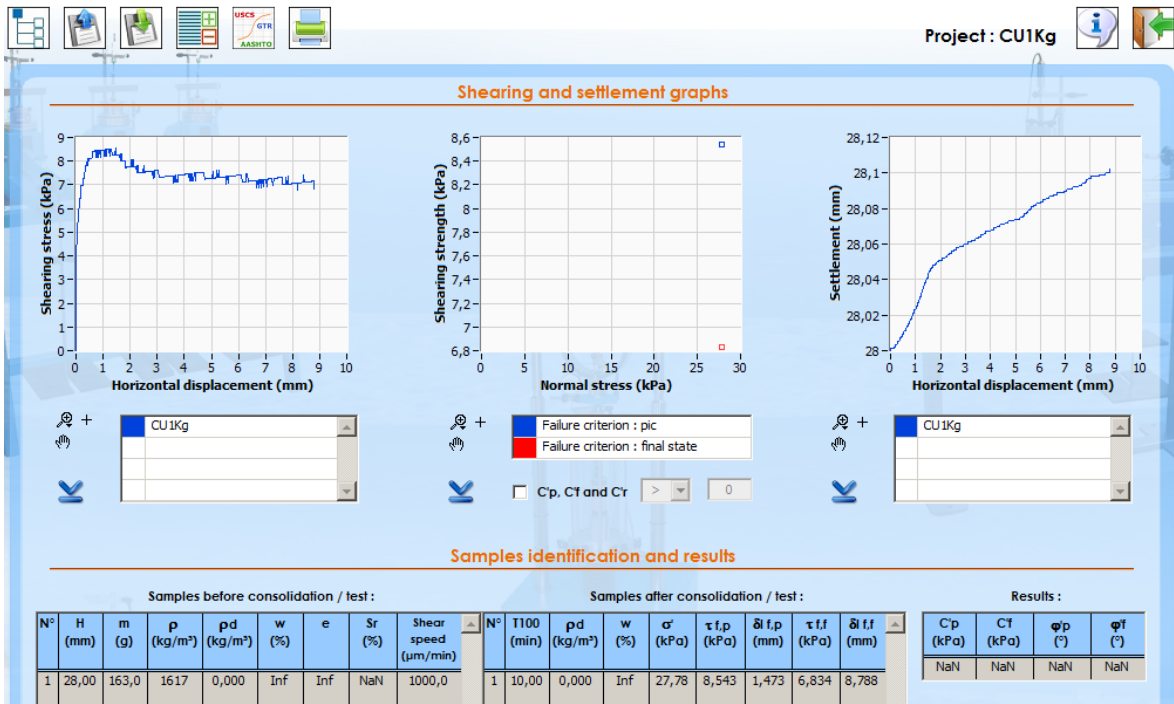
$$d_f = 0,0067$$

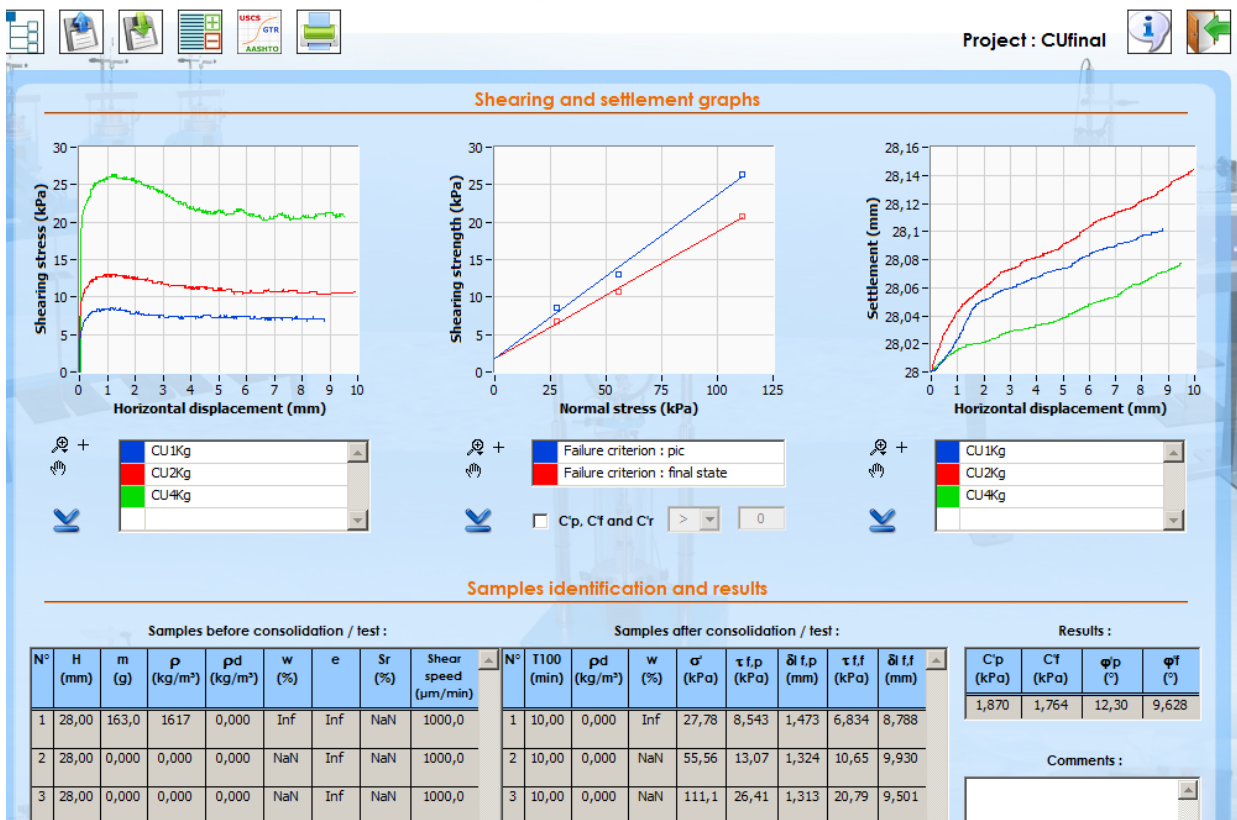
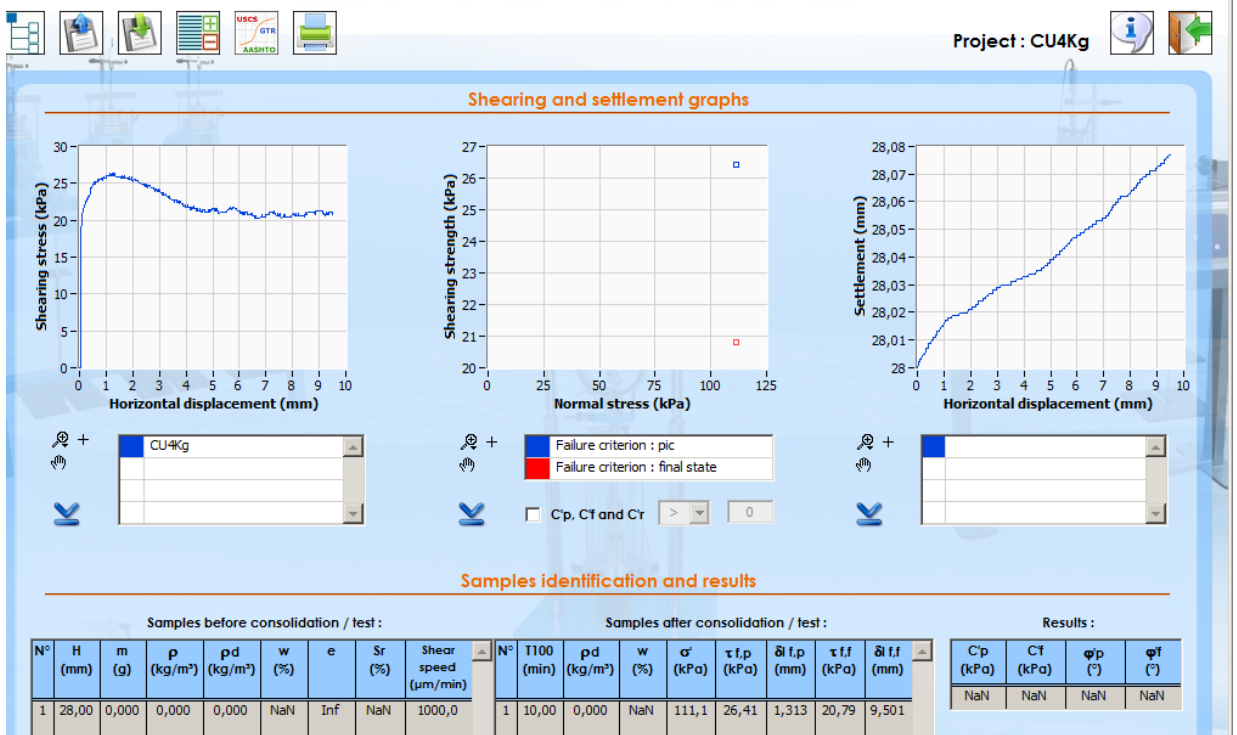
$$V_{max} = \frac{d_f}{t_f} = \frac{0,0067}{0,003266667} = 2,051020408 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 0,003902246 \text{ mm/min}$$

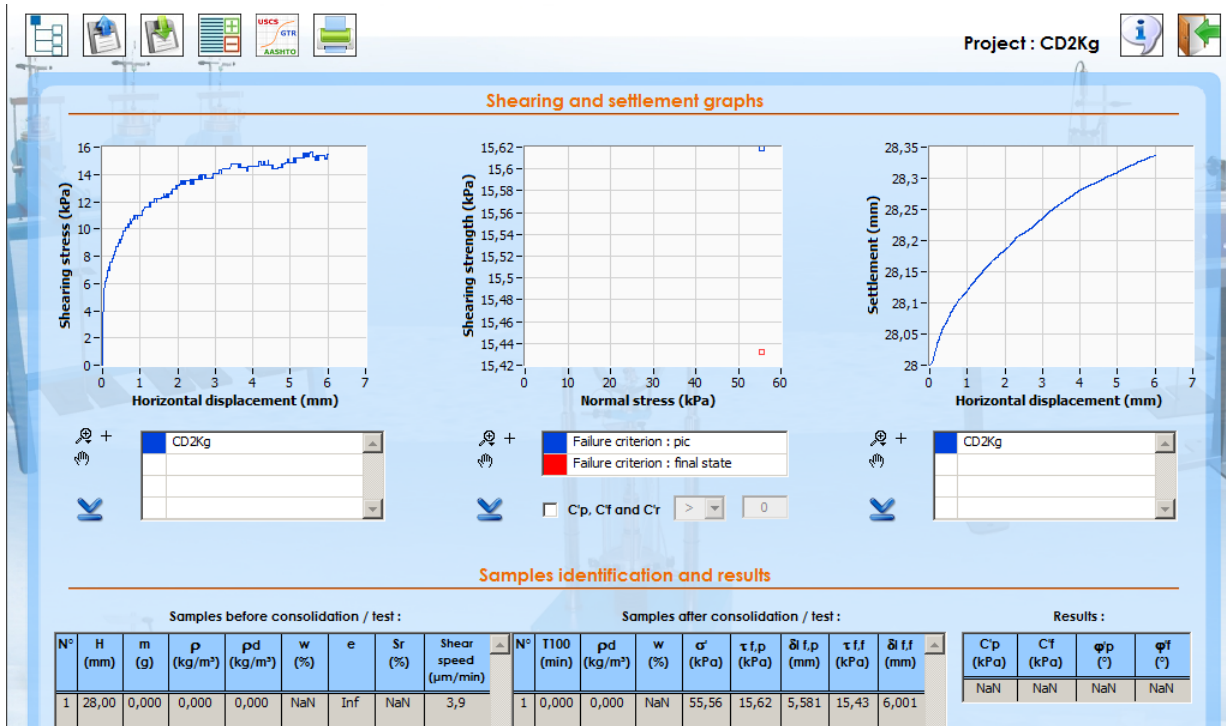
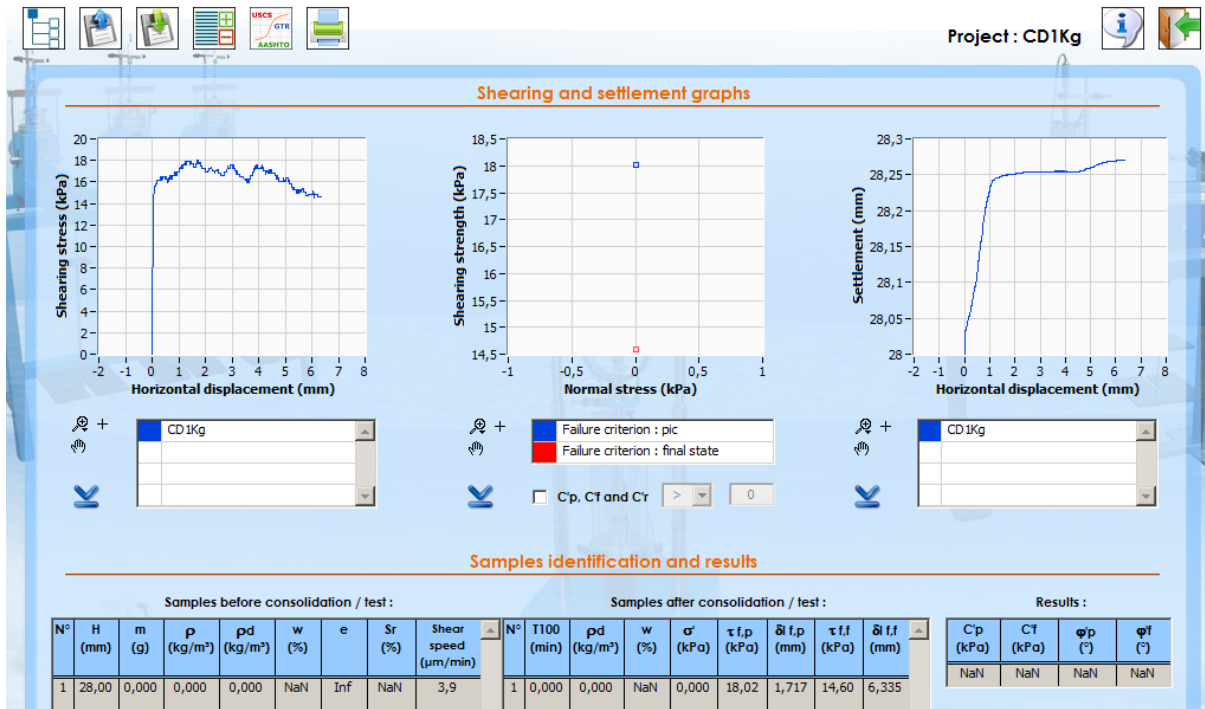
Ensayo consolidado – no drenado (CU).

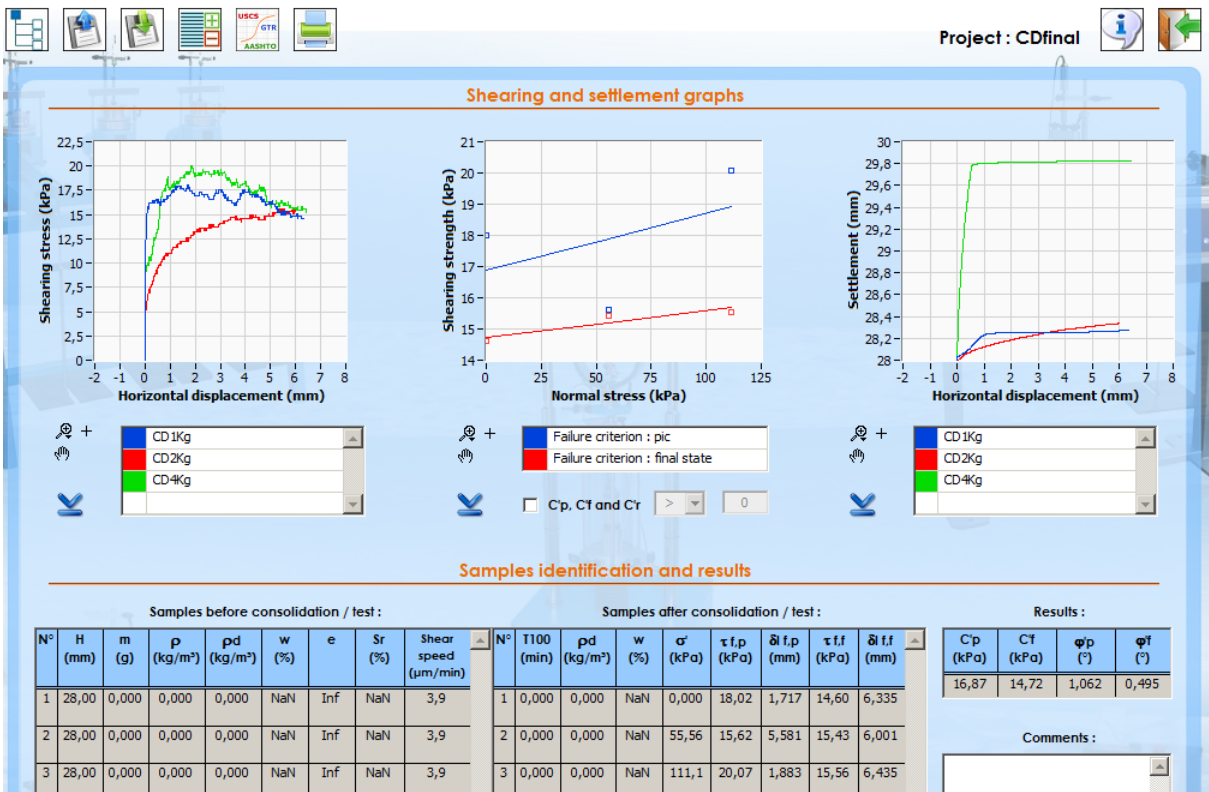
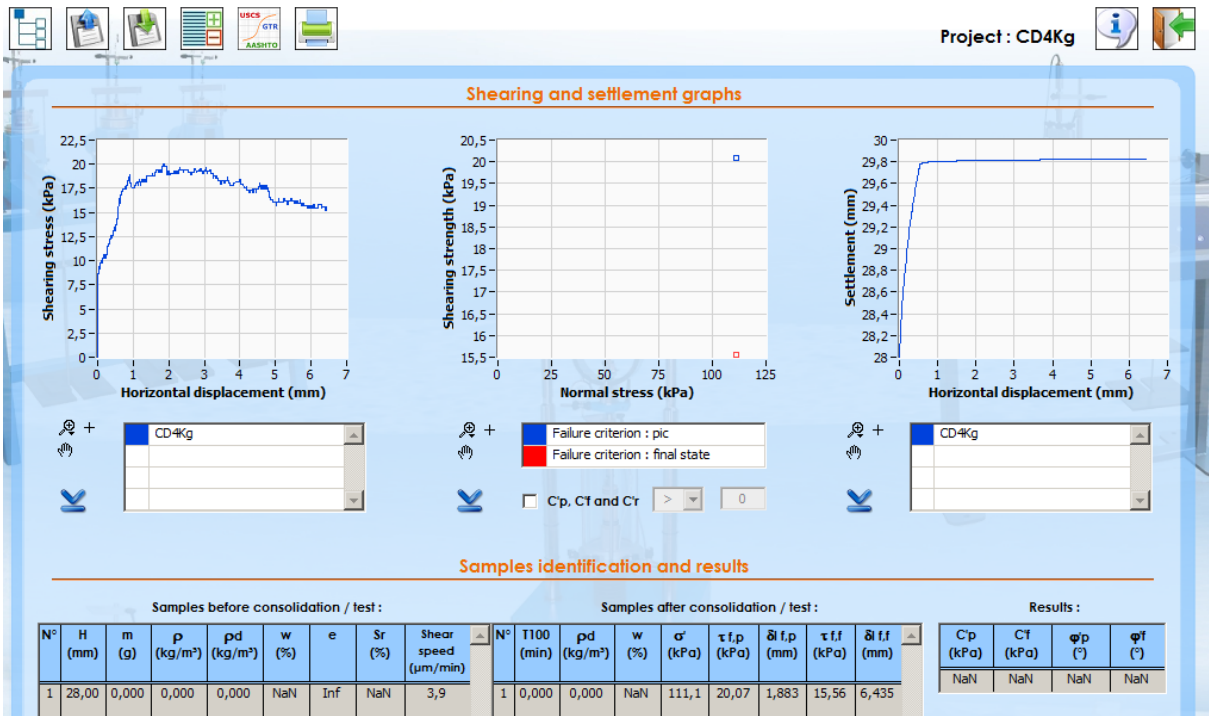
La velocidad elegida ha sido de 1 mm/min, velocidad que hará que no se pueda producir drenaje al ser bastante rápida. Este valor nos lo indica la norma UNE 103401 en el apartado 7.2.3. donde textualmente nos dice que “una velocidad apropiada para este ensayo debe estar en el rango de 0,5 mm/min a 1,5 mm/min”, por lo que se ha decidido tomar un valor intermedio de 1 mm/min.

ANEXO 2: Resultados obtenidos con el programa ShearLab reports









6 Bibliografía

- 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.