

Julio 1998

TÍTULO

Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo

Determination of the shear strenght of a soil with the direct shear box.

Determination du parametres de resistnace a la contrainte de cisaillement d'un sol dans la boite de cisaillement direct.

CORRESPONDENCIA

OBSERVACIONES

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 103 *Geotecnia* cuya Secretaría desempeña MINISTERIO DE FOMENTO.

Editada e impresa por AENOR
Depósito legal: M 29325:1998

©AENOR 1998
Reproducción prohibida

LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A:

AENOR

C Génova, 6
28004 MADRID-España

Asociación Española de
Normalización y Certificación

Teléfono 91 432 60 00
Fax 91 310 40 32

33 Páginas

Grupo 17

ÍNDICE

	Página
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	4
2 NORMAS PARA CONSULTA	4
3 MODALIDADES DE ENSAYO QUE CONTEMPLA ESTA NORMA	4
4 APARATOS Y MATERIAL NECESARIO	4
4.1 Aparato de corte directo	4
4.2 Balanza para determinaciones de masas	6
4.3 Tallador de probetas	6
4.4 Material para realizar la compactación	6
4.5 Aparatos y material necesario para la determinación de la humedad, según la Norma UNE 103300	7
4.6 Aparatos y material necesario para la compactación de probetas, según la Norma UNE 103500	7
4.7 Cámara húmeda	7
4.8 Material auxiliar	7
5 OPERACIONES Y MEDIDAS INICIALES	7
6 PREPARACIÓN Y MONTAJE DE LAS PROBETAS PARA EL ENSAYO	8
6.1 Suelo cohesivo inalterado	8
6.2 Suelo cohesivo remoldeado	9
6.3 Suelos no cohesivos (arenosos)	10
7 PROCEDIMIENTOS OPERATORIOS	13
7.1 Ensayo consolidado-drenado (CD)	13
7.2 Ensayo consolidado-no drenado (CU)	18
7.3 Ensayo no consolidado-no drenado (UU)	19
7.4 Ensayos con varias pasadas. Resistencia residual	19
8 OBTENCIÓN Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS. REPRESENTACIONES GRÁFICAS	20
8.1 Datos generales	21
8.2 Tensiones y desplazamientos	22
8.3 Representaciones gráficas	25
9 CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS	26

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

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

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

Esta norma se utiliza preferentemente en muestras de suelos con partículas de pequeño tamaño, como arenas, limos y arcillas. No obstante, se puede extender a muestras de suelos con partículas de mayor tamaño, como gravas, bolos, etc., utilizando aparatos de dimensiones adecuadas.

2 NORMAS PARA CONSULTA

UNE 103300 – *Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.*

UNE 103500 – *Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor Normal.*

3 MODALIDADES DE ENSAYO QUE CONTEMPLA ESTA NORMA

Para determinar los parámetros resistentes, cohesión, c , y ángulo de rozamiento interno, ϕ , de una muestra de suelo, 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.

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 .

4 APARATOS Y MATERIAL NECESARIO

Los aparatos y material que se necesitan son los siguientes:

4.1 Aparato de corte directo

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

4.1.1 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 mm¹⁾.

La caja de corte está dividida horizontalmente en dos mitades. La superior lleva solidario un dispositivo en forma de yugo, denominado "cuello de cisne" en la figura 1. 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 base acañalada 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 un par de asas para facilitar su manipulación. [Véase la figura 1 (a)].

La caja de corte se sitúa en el interior de un carro deslizante (véase la figura 1(c)), en el cual la parte inferior de aquélla queda rígidamente bloqueada.

4.1.2 Carro deslizante. 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 1 (c) se muestra un diagrama del carro deslizante y de la caja de corte dispuestos para el ensayo.

4.1.3 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.

4.1.4 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.

4.1.5 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 rótula.

Se debe situar el pistón de carga sobre la placa porosa.

En la figura 1 (b) 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.

1) Normalmente, en suelos compactados se utilizan las cajas de corte cuadradas, mientras que las circulares se suelen emplear con muestras inalteradas.

4.1.6 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.

4.1.7 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 8 mm.

4.1.8 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.

4.1.9 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 éste.

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.

4.1.10 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.

4.2 Balanza para determinaciones de masas

Una balanza de precisión 0,01 g.

4.3 Tallador de probetas

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.

4.4 Material para realizar la compactación:

- Una maza de compactación tipo Army, de 0,5 kg de masa, altura de caída de 200 mm y base de golpeo cuadrada de 21 mm de lado.
- Una base de compactación, rígida, con los elementos adecuados para fijar sobre ella la mitad superior de la caja de corte.
- Un collarín con forma adecuada, para suplementar la caja de corte y facilitar así el proceso de compactación.
- Una pieza prismática, de base cuadrada, de lado inferior en 0,5 mm a las dimensiones internas de la caja de corte, para compactación en forma estática. Puede llevar una marca a una altura igual a la de la placa porosa superior más la placa ranurada, o un tope a esta misma altura.

- Los instrumentos necesarios para el enrase del suelo en el tallador, tales como, cuchillos, sierras de hilo, espátulas de diferentes hojas, etc.
- Una pieza para enrasar la superficie de la probeta cuando ésta se prepare dentro de la caja de corte, para que consiga así un nivel determinado en suelos no cohesivos.

4.5 Aparatos y material necesario para la determinación de la humedad, según la norma UNE 103300

4.6 Aparatos y material necesario para la compactación de probetas, según la norma UNE 103500

4.7 Cámara húmeda

Una cámara húmeda, que disponga de un sistema adecuado para regular la temperatura a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa a $95\% \pm 3\%$.

4.8 Material auxiliar

Como material auxiliar se precisa:

- Bandejas para contener el tallador o la caja de corte durante el tallado.
- Grasa de silicona.
- Cronómetro de precisión 1 s.
- Calibre de precisión 0,1 mm.

5 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 acanalada dentro de la caja.

Periódicamente se deben efectuar las siguientes medidas:

- Masa de la mitad superior de la caja de corte, m_c , con una precisión de 0,01 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_r , con una precisión de 0,1 mm.

6 PREPARACIÓN Y MONTAJE DE LAS PROBETAS PARA EL ENSAYO

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

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

Normalmente se preparan tres probetas similares, a partir de 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 descritas en el apartado 4.1.1, el tamaño máximo de la partícula de suelo no debe ser superior a la décima parte de la altura de la probeta.

6.1 Suelo cohesivo inalterado

Tanto si la muestra viene en un tubo tomamuestra, como si viene en bloque se debe separar, en una porción de muestra, la cantidad de suelo necesario para la preparación de una probeta, con la precaución de que sus dimensiones excedan en 2 ó 3 cm a las finales de ésta. El resto del material se debe guardar en condiciones adecuadas para evitar pérdidas de humedad.

NOTA – En suelos muy compresibles es necesario tomar mayor cantidad en la dirección que corresponda a la altura de la probeta, para asegurar que, una vez consolidada, el plano de corte quede aproximadamente a media altura de ésta.

Se alisa una de las bases de la porción de muestra tomada y se coloca sobre una superficie horizontal. Se va introduciendo el tallador en dicha porción de muestra al mismo tiempo que se tallan las superficies laterales, manteniéndolo en todo momento horizontal. Cuando sobresalga material por ambos extremos del tallador se procede a eliminarlo mediante sierras de alambre, cuchillos u otros elementos cortantes, enrasando finalmente ambas caras. Se rellena con material sobrante las posibles oquedades que aparezcan en esta operación, evitando un suavizado final de ambas caras.

Del suelo sobrante durante el proceso de tallado, se toma una pequeña cantidad para determinar la humedad inicial, siguiendo el procedimiento operatorio indicado en la norma UNE 103300.

Se determina la masa del tallador más el suelo, con una precisión de 0,01 g y se calcula la masa húmeda inicial, m_{hi} , de la probeta, por diferencia entre éste valor y la masa del tallador, m_t .

Este mismo proceso se puede efectuar utilizando, en lugar del tallador, la mitad superior de la caja de corte. En tal caso, una vez enrasadas ambas caras, se determina la masa de la parte superior de la caja de corte más el suelo, con una precisión de 0,01 g y se calcula la masa húmeda inicial de la probeta, m_{hi} , por diferencia entre este valor y la masa de la mencionada mitad de la caja, m_c .

Se prepara la mitad inferior de la caja de corte con la placa base, una placa ranurada con orificios, dispuesta con la parte lisa hacia arriba y una placa porosa. Sobre dicha mitad se fija, mediante los tornillos pasantes, la mitad superior.

Si se ha utilizado el tallador, se coloca éste sobre la caja de corte, perfectamente alineado y con sus bordes cortantes hacia arriba. Se empuja sobre la probeta, introduciéndola en la caja de corte hasta que descansa sobre la placa porosa inferior.

Si la probeta se ha preparado sobre la mitad superior de la caja de corte, basta con empujarla hasta que descansa, como en el caso anterior, sobre la placa porosa inferior.

Por último, se coloca una placa porosa sobre la probeta, ejerciendo 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 precisión de 0,1 mm. Sobre ésta se disponen la placa ranurada¹⁾ y el pistón de carga.

6.2 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 probeta. Si se seca al aire se debe determinar la humedad higroscópica.

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

6.2.1 Con densidad seca determinada. Del suelo preparado en el apartado 6.2, 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 sobre el suelo la pieza prismática descrita en el apartado 4.4. 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 ésta, se disponen la placa ranurada y el pistón de carga.

6.2.2 Compactación dinámica a una energía determinada. El procedimiento que se describe a continuación utiliza la energía del ensayo Proctor normal de 0,583 J/cm³, ya que es la más usual. No obstante se puede utilizar cualquier otra, dependiendo de las peculiaridades de cada caso.

Normalmente se siguen dos procedimientos:

- 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 ésta se tallan tres probetas de suelo para efectuar el ensayo de corte.
- Se compacta directamente cada probeta en la mitad superior de la caja de corte.

1) La placa ranurada no es necesaria. Su utilización se deja a criterio del operador.

6.2.2.1 Compactación en el molde Proctor normal. Del suelo preparado en el apartado 6.2, se toma la cantidad necesaria para llenar un 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 descrito en el apartado 6.1.

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.

6.2.2.2 Compactación directa sobre la mitad superior de la caja. Del suelo preparado en el apartado 6.2, 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 descrita en el apartado 4.4, 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 descrito en el apartado 4.4, 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/cm³. 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 hallar la masa húmeda inicial de la probeta, m_{hi} .

Se colocan la placa base acanalada, la placa ranurada y una placa porosa en la mitad inferior de la caja de corte. Sobre ésta 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.

6.3 Suelos no cohesivos (arenosos)

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

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

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

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

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

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

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

NOTA – Si se desea conseguir una densidad seca determinada se deben repetir las operaciones anteriores hasta que se consiga.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Se coloca dicha masa de suelo en un recipiente con agua y se hierve durante 10 min.

Después se deja enfriar hasta alcanzar la temperatura de equilibrio. Alternativamente se puede saturar el suelo sometiéndolo a vacío.

Se monta la caja de corte con la placa base acanalada, placa porosa y placa ranurada con orificios, con las ranuras hacia arriba y la dirección de éstas perpendicular a la de corte.

Se sitúa dicha caja en el carro deslizante y se llena con agua hasta un nivel que coincida aproximadamente con el de la altura final de la probeta de suelo.

Se vierte la arena saturada dentro de la caja de corte y se compacta por vibración.

Se nivela la superficie de la arena, se coloca la placa ranurada con orificios, con las ranuras hacia abajo, en contacto con la probeta de suelo y la dirección de éstas perpendicular a la de corte. Se empuja hacia abajo sobre dicha placa de modo que las ranuras se introduzcan en la probeta, procurando dentro de lo posible que el conjunto quede horizontal.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

7 PROCEDIMIENTOS OPERATORIOS

A continuación se especifican los procedimientos operatorios en función de cada tipo de ensayo:

7.1 Ensayo consolidado-drenado (CD)

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

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, centrándole si fuese necesario.

Se mide la altura, h_5 , desde el borde superior del pistón de carga hasta la superficie de la caja de corte, con una precisión de 0,1 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 centrado, comprobando que tiene suficiente recorrido en los dos sentidos. Se pone a cero o se anota la lectura inicial.

7.1.2 Consolidación. Determinación de la velocidad de rotura

7.1.2.1 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_v , en kPa. Esta tensión debe ser fijada por el técnico responsable. A continuación se pone en marcha el cronómetro.

NOTA – Cuando la tensión vertical a aplicar es muy alta, es aconsejable empezar con una intermedia antes de llegar a la carga definitiva.

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.

7.1.2.2 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:

7.1.2.2.1 Método logarítmico o de Casagrande. Nada más poner en marcha el cronómetro, según se especifica en el apartado 7.1.2.1, se toman 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. [Véase la figura 2(a)]. Se continúan tomando lecturas hasta que finalice la consolidación primaria. En la mayoría de los suelos suele ser suficiente con 24 h.

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, como se indica en la figura 2(a), dos tiempos que estén en la relación de 1 a 4, por ejemplo 1 min y 4 min en dicha figura. 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 intersección 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. En la figura 2(a) estas dos lecturas coinciden, lo que equivale a que el asiento inicial es nulo, aunque en general esto no ocurre.

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:

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

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 expresión:

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

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. La decisión la debe tomar el técnico responsable¹⁾.

1) En ocasiones esta estimación del desplazamiento, d_f , puede ser errónea por exceso o por defecto. En el primer caso se podrían generar presiones intersticiales en el plano de corte que alterarían los valores de las tensiones efectivas medidas; en tal caso ese primer ensayo se puede tomar como dato orientativo para seleccionar otro valor de d_f más adecuado. En el segundo caso se estaría por el lado de la seguridad.

NOTA – A título orientativo, se muestra la siguiente tabla para cajas de corte cuadradas de 60 mm de lado, en donde se relaciona el tipo de suelo ensayado con el desplazamiento de la caja para alcanzar la máxima resistencia.

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

Finalmente, para obtener la máxima velocidad de desplazamiento horizontal, $V_{\text{máx.}}$, en mm/min, se aplica la siguiente fórmula:

$$V_{\text{máx.}} = \frac{d_f}{t_f}$$

Véase el modelo de impreso para expresión de resultados que se muestra en la figura 3.

7.1.2.2.2 Método de Taylor o de la raíz cuadrada del tiempo. Nada más poner en marcha el cronómetro, según se especifica en el apartado 7.1.2.1, 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. [Véase la figura 2 (b)]. Se continúan tomando lecturas hasta que finalice la consolidación primaria. En la mayoría de los suelos suele ser suficiente 24 h.

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(b) 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} . [Véase la figura 2(b)].

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

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

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:

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

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 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 expresión:

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

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. La decisión la debe tomar el técnico responsable. (Véase nota del apartado 7.1.2.2.1).

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

$$V_{máx} = \frac{d_f}{t_f}$$

Véase el modelo de impreso para expresión de resultados que se muestra en la figura 4.

7.1.2.2.3 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} . [Véase la figura 2 (b)].

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

$$t_f = 12,7 \cdot t_{100}$$

En este momento se debe estimar para qué desplazamiento horizontal, d_f , se alcanza la resistencia de corte máxima. La decisión la debe tomar el técnico responsable. (Véase nota del apartado 7.1.2.2.1).

Finalmente, para obtener la máxima velocidad de desplazamiento horizontal, $V_{\text{máx.}}$, en mm/min, se aplica la siguiente fórmula:

$$V_{\text{máx.}} = \frac{d_f}{t_f}$$

Véase el modelo de impreso para expresión de resultados que se muestra en la figura 4.

7.1.3 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 dure entre 5 min y 10 min. En suelos cohesivos, la velocidad de desplazamiento no debe sobrepasar la $V_{\text{máx.}}$ calculada por cualquiera de los tres métodos anteriores.

NOTA – La velocidad de desplazamiento dada por los constructores es la velocidad sin carga. Bajo carga, la velocidad puede ser inferior a aquella. Además, hay que tener en cuenta la deformación del anillo dinamométrico, si se usa, y del resto de componentes horizontales. Por tanto, para conocer el movimiento relativo entre las dos mitades de la caja de corte, se deben hacer las correcciones oportunas. (Véase apartado 4.1.9).

Se debe comprobar que todos los componentes horizontales estén en contacto, pero sin carga horizontal.

Se retiran los dos tornillos pasadores que fijan las dos mitades de la caja de corte. Acto seguido se introducen los dos tornillos separadores girándolos hasta que hagan contacto con la mitad inferior de la caja de corte. Se giran simultáneamente ambos tornillos media vuelta para que se produzca la separación de las dos mitades de dicha caja. A continuación se giran unas vueltas, en sentido contrario al anterior, para separarlos de 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.

7.1.4 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. En aquéllos en los que se pueda producir una rotura frágil, como en las arenas muy densas, las lecturas se deben tomar por intervalos de fuerza horizontal o del tiempo, para poder fijar la resistencia máxima.

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

Actuando manualmente o con el motor se llevan ambas mitades de la caja de corte a su posición inicial, si lo permite el diseño del aparato.

Si el ensayo se realiza con la probeta inundada de agua, se extrae ésta y se deja que drene unos 10 min.

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

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

Se determina la masa húmeda final de la probeta, m_{hf} , con una precisión de 0,01 g. Se deseca en estufa a una temperatura inferior a 60 °C hasta masa constante y se determinan la masa seca final de la probeta, m_{df} , con una precisión de 0,01 g, y la humedad final, w_f , en %.

7.2 Ensayo consolidado-no drenado (CU)

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

7.2.1 Ajustes iniciales. Se sigue el procedimiento indicado en el apartado 7.1.1.

7.2.2 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_v , 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 cronómetro.

Se llena, tan pronto como sea posible, el carro deslizante con agua hasta el nivel superior de la probeta y se mantiene 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.

7.2.3 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. (Véase nota del apartado 7.1.3).

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.

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

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

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

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_{hf} , con una precisión de 0,01 g. Se deseca en estufa a una temperatura inferior a 60 °C hasta masa constante y se determinan la masa seca final de la probeta, m_{df} , con una precisión de 0,01 g, 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.

7.3 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.

7.3.1 Ajustes iniciales. Se coloca el carro de deslizamiento con la caja perfectamente ensamblada sobre los cojinetes, centrando éstos 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 que el pistón de carga vertical está perfectamente centrado.

Acto seguido, se ensambla el yugo de aplicación de la fuerza vertical, haciendo que descansen 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 centrado, comprobando que tiene suficiente recorrido en los dos sentidos. Se pone a cero o se anota la lectura inicial.

7.3.2 Ajustes antes de la rotura. Se sigue el procedimiento indicado en el apartado 7.2.3.

7.3.3 Rotura de la probeta. Se sigue el procedimiento indicado en el apartado 7.2.4. En este caso, no es necesario determinar la masa húmeda 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.

7.4 Ensayos 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.

7.4.1 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 corte¹⁾.

Se determina la masa húmeda final de la probeta, m_{hf} , con una precisión de 0,01 g. Se deseca en estufa a menos de 60 °C hasta masa constante y se determinan la masa seca final de la probeta, m_{df} , con una precisión de 0,01 g, así como la humedad final, w_f , en tanto por ciento.

7.4.2 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 minutos.

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 corte¹⁾.

Se determina la masa húmeda final de la probeta, m_{hf} , con una precisión de 0,01 g. Se deseca en estufa a menos de 60 °C hasta masa constante, y se determinan la masa seca final de la probeta, m_{df} , con una precisión de 0,01 g, así como la humedad final, w_f , en tanto por ciento.

8 OBTENCIÓN Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS. REPRESENTACIONES GRÁFICAS

En este apartado se explican los procedimientos de cálculo a seguir para determinar los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante: cohesión y ángulo de rozamiento interno.

1) En determinados ensayos puede ser interesante realizar un esquema de las dos superficies de corte, o incluso fotografiarlas.

8.1 Datos generales

Véase el modelo de impreso de expresión de datos del ensayo que se muestra en la figura 5.

Humedad inicial

La humedad inicial, w_i , expresada en %, se puede calcular tomando una pequeña cantidad de suelo durante la preparación de la probeta y siguiendo el procedimiento operatorio descrito en la Norma UNE 103300, o utilizando las masas iniciales húmeda, m_{hi} , y seca, m_{di} , de la probeta, según la expresión:

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

Densidad aparente

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

$$\rho = \frac{m_{hi}}{A \times h} \times 1\,000$$

donde

m_{hi} es la masa húmeda inicial de la probeta, en g;

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

h es la altura inicial de la probeta, en mm.

NOTA – En una muestra cohesiva inalterada, h es la altura del tallador o de la mitad superior de la caja de corte.

En una muestra cohesiva remoldeada, h se debe determinar, conociendo h_1 , h_2 , y h_t , mediante la expresión:

$$h = h_1 - h_2 - h_t$$

donde

h_1 es la distancia desde el borde superior de la caja hasta la placa base, en mm;

h_2 es la distancia desde el borde superior de la caja hasta la placa porosa (suelos cohesivos), en mm;

h_t es la altura total de las placas utilizadas en el ensayo, en mm.

En un suelo no cohesivo, h se determina mediante la expresión:

$$h = h_1 - h_3 - h_t$$

donde

h_3 es la distancia desde el borde superior de la caja hasta la placa ranurada (suelos no cohesivos), en mm.

Densidad seca inicial

La densidad seca inicial, ρ_d , expresada en g/cm³, se determina mediante la ecuación:

$$\rho_d = \frac{m_{di}}{A \cdot h} \times 1\,000$$

Índice de huecos inicial

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

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

donde

ρ_s es la densidad de las partículas, en g/cm³.

Grado de saturación inicial

El grado de saturación inicial, S_i , expresado en %, se determina mediante la ecuación:

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

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.

8.2 Tensiones y desplazamientos

Se calcula la fuerza horizontal aplicada a la probeta, F_h , expresada en N, para cada lectura durante el ensayo. (Véase el modelo de impreso para expresión de datos de la rotura que se muestra en la figura 6).

Se calcula la tensión de corte sobre la superficie de rotura de la probeta, τ , expresada en kPa, para cada lectura durante el ensayo, mediante la ecuación:

$$\tau = \frac{F_h}{A} \times 1\,000$$

donde

A es el área inicial de la probeta, en mm².

NOTA – Normalmente se toma A como constante, aunque durante el corte el área va disminuyendo. Si se desea obtener el área efectiva de aplicación de las fuerzas verticales, se debe seguir el procedimiento siguiente:

Caja de corte cuadrada:

El área corregida en cualquier instante durante el ensayo, A_c , expresada en mm², es:

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

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 en mm.

Caja de corte circular:

El área corregida en cualquier instante durante el ensayo, A_c , expresada en mm², es:

$$A_c = 2 R^2 \alpha - \Delta l R \sin \alpha$$

donde

$\alpha = \arccos \Delta l / 2R$, expresado en radianes;

Δl es el desplazamiento relativo entre las dos mitades de la caja de corte, expresado en mm;

R es el radio interno de la caja de corte, expresado en mm.

Para cajas circulares de corte de 50 mm de diámetro se puede utilizar la siguiente tabla:

Desplazamiento relativo entre las dos mitades de la caja de corte, Δl mm	Área corregida, A_c mm ²	Desplazamiento relativo entre las dos mitades de la caja de corte, Δl mm	Área corregida, A_c mm ²
0,0	1963,5	5,0	1713,9
0,1	1958,5	5,1	1708,9
0,2	1953,5	5,2	1704,0
0,3	1948,5	5,3	1699,0
0,4	1943,5	5,4	1694,0
0,5	1938,5	5,5	1689,1
0,6	1933,5	5,6	1684,1
0,7	1928,5	5,7	1679,1
0,8	1923,5	5,8	1674,2
0,9	1918,5	5,9	1669,2
1,0	1913,5	6,0	1664,2
1,1	1908,5	6,1	1659,3
1,2	1803,5	6,2	1654,3
1,3	1898,5	6,3	1649,3
1,4	1893,5	6,4	1644,4
1,5	1888,5	6,5	1639,4
1,6	1883,5	6,6	1634,5
1,7	1878,5	6,7	1629,5
1,8	1873,5	6,8	1624,6
1,9	1868,5	6,9	1619,6
2,0	1863,5	7,0	1614,6
2,1	1858,5	7,1	1609,7
2,2	1853,5	7,2	1604,7
2,3	1848,5	7,3	1599,8
2,4	1843,5	7,4	1594,9
2,5	1838,5	7,5	1589,9
2,6	1833,6	7,6	1585,0
2,7	1828,6	7,7	1580,0
2,8	1823,6	7,8	1575,1
2,9	1818,6	7,9	1570,2
3,0	1813,6	8,0	1565,2
3,1	1808,6	8,1	1560,3
3,2	1803,6	8,2	1555,3
3,3	1798,6	8,3	1550,4
3,4	1793,6	8,4	1545,5
3,5	1788,6	8,5	1540,6
3,6	1783,7	8,6	1535,6
3,7	1778,7	8,7	1530,7
3,8	1773,7	8,8	1525,7
3,9	1768,7	8,9	1520,9
4,0	1763,7	9,0	1515,9
4,10	1758,7	4,50	1738,8
4,20	1753,7	4,60	1733,8
4,30	1748,8	4,70	1728,8
4,40	1743,8	4,80	1723,9
		4,90	1718,9

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

$$\sigma_n = \frac{\Sigma F_v}{A} \times 10^3$$

donde

ΣF_v es la suma total de las fuerzas verticales aplicadas a la probeta, expresadas en N;

A es el área inicial de la probeta, expresada en mm².

NOTA – Si se desea la tensión normal con la corrección de área, se toma el área corregida, A_c , en mm², en el desplazamiento relativo correspondiente a la resistencia al corte máxima. (Véase nota del apartado 8.2).

Si se realiza el ensayo con varias pasadas, en la segunda y posteriores pasadas, se calcula el desplazamiento para cada lectura, añadiendo al desplazamiento observado en la pasada actual, el desplazamiento total acumulado al final de la pasada anterior.

Se calcula la deformación vertical acumulada en cada pasada con relación a la altura inicial de la probeta.

8.3 Representaciones gráficas

En un ensayo normal, se deben realizar las siguientes operaciones. (Véase el impreso para la representación gráfica de resultados que se muestra en la figura 7).

- 1 En un gráfico, se representan en ordenadas las tensiones tangenciales expresada en kPa y en abscisas el desplazamiento horizontal, expresado en mm, correspondientes a cada una de las probetas ensayadas.
- 2 De cada relación tensión-deformación, se toman el valor de la resistencia tangencial máxima, $\tau_{m\acute{a}x.}$, en kPa, y la deformación horizontal correspondiente.
- 3 En un mismo gráfico se representan en escala decimal, la tensión tangencial máxima, $\tau_{m\acute{a}x.}$, 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 $\tau_{m\acute{a}x.}$ 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 dada en 8.1.

Si se realiza el ensayo con varias pasadas, se deben realizar las siguientes operaciones:

- 1 Se representan las tensiones tangenciales, en kPa, en ordenadas, y el desplazamiento acumulado en el sentido de corte, en mm, en abscisas, en un mismo gráfico y sucesivamente.
- 2 De la relación tensión-deformación de la primera rotura, se anotan los valores de la resistencia tangencial máxima o resistencia de pico, $\tau_{m\acute{a}x.}$, en kPa, y el correspondiente desplazamiento, en mm.

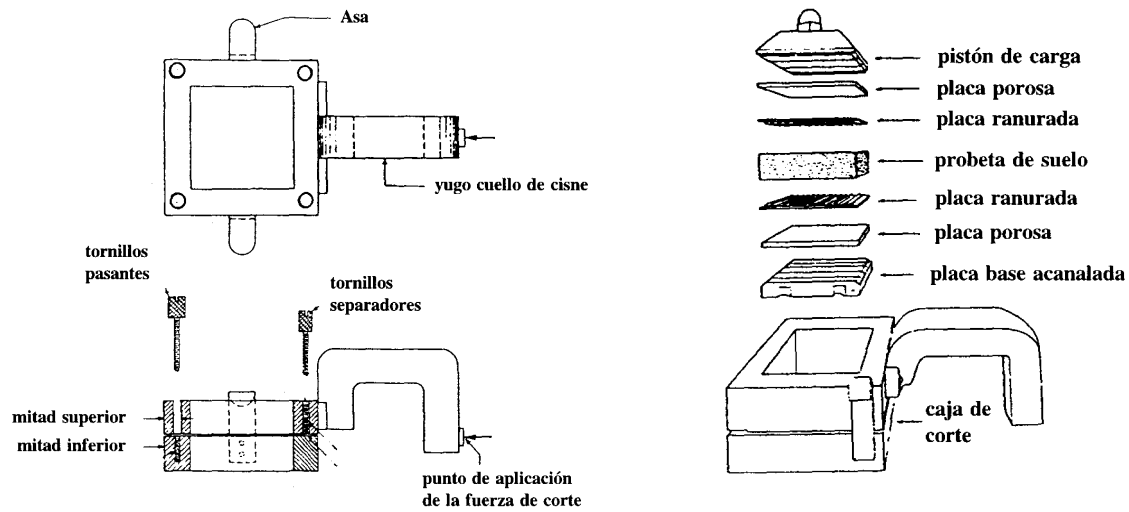
- 3 De la última pasada se obtiene el valor residual de la tensión tangencial, τ_r , en kPa.
- 4 En un mismo gráfico se representan, la resistencia máxima, $\tau_{m\acute{a}x.}$, referida en la operación 2, en kPa, y la resistencia residual, τ_r , referida en la operación 3, en kPa, en ordenadas, y las tensiones normales correspondientes, σ_r , en kPa, en abscisas, con la misma escala decimal, de todas las probetas ensayadas.
- 5 Se puede representar el cambio de altura que experimenta la probeta durante el ensayo de corte (deformación vertical), en mm, en ordenadas y el desplazamiento horizontal acumulado en el sentido del corte, en mm, en abscisas. Es conveniente expresar los cambios de altura en forma de índices de huecos, según la expresión dada en 8.1.

Se puede suponer que las relaciones entre $\tau_{m\acute{a}x.}$ y σ_n y entre τ_r y σ_n son lineales; por tanto, la pendiente de la línea de mejor ajuste de $\tau_{m\acute{a}x.}$ y σ_n , y el punto de corte con el eje de ordenadas, dan los parámetros resistentes del suelo, ángulo de rozamiento interno y cohesión, respectivamente. De la misma forma la pendiente de la línea de mejor ajuste de τ_r y σ_n , y el punto de corte con el eje de ordenadas, dan los parámetros resistentes residuales del suelo, ángulo de rozamiento interno y cohesión, respectivamente.

9 CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

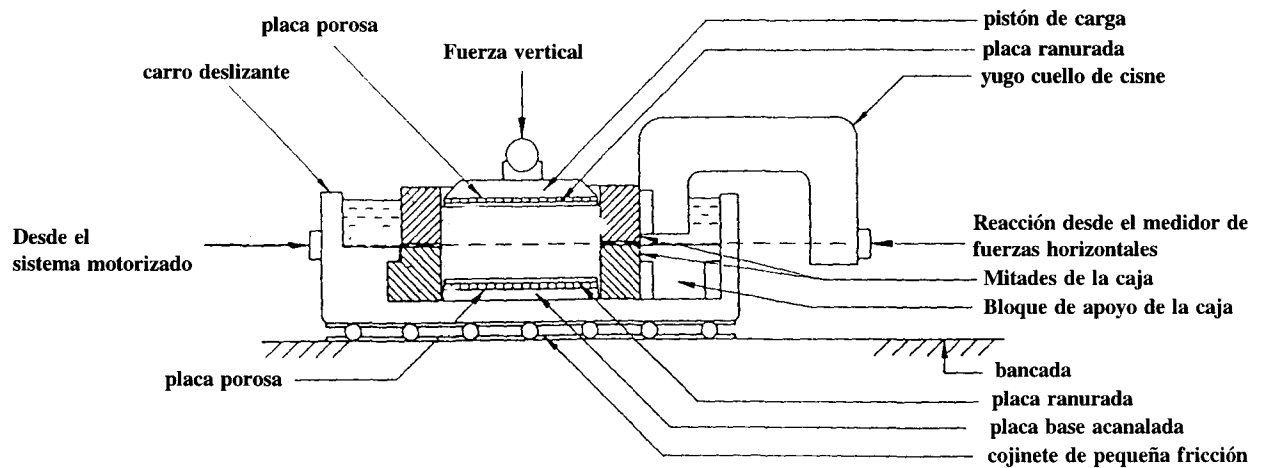
Esta norma concuerda esencialmente con:

BS 1377: Part 7: 1990 – *Determination of shear strength by direct shear (small shearbox apparatus).*



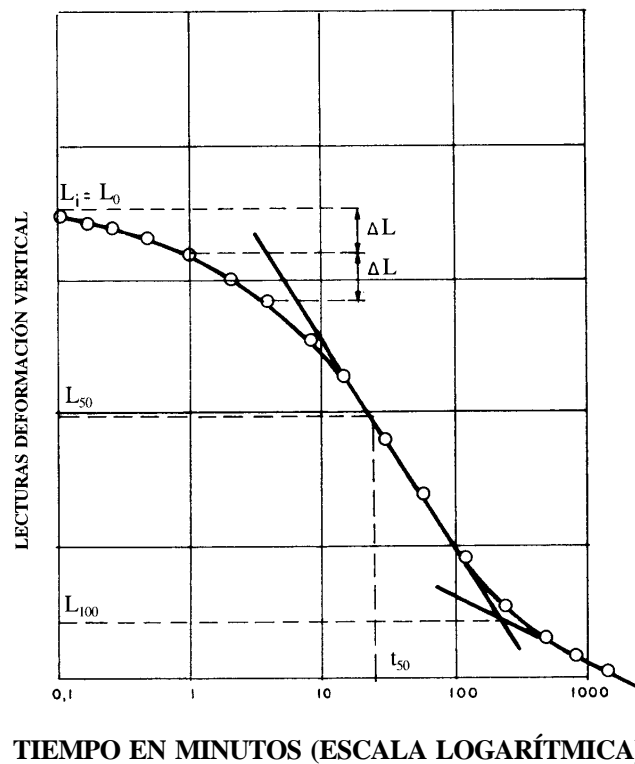
(a) Detalles de la caja de corte

(b) Componentes de la caja de corte

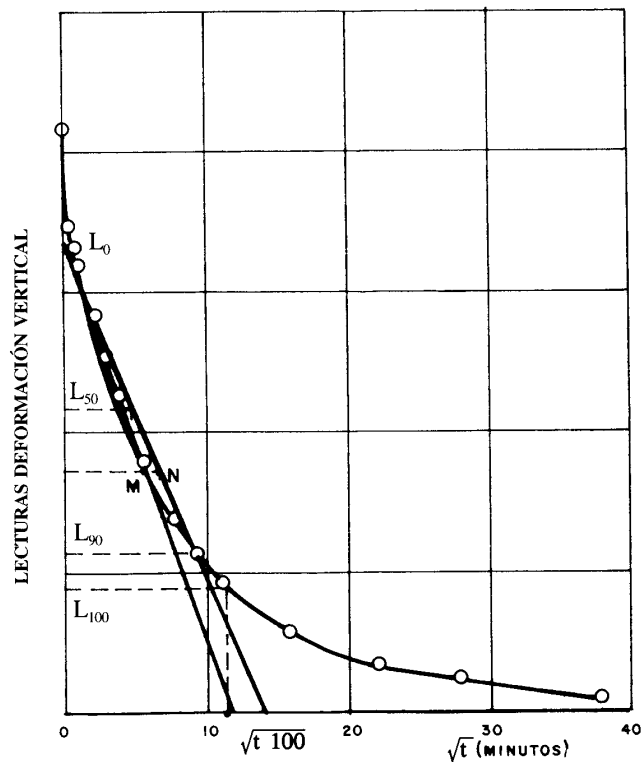


(c) Disposición general de la caja y del carro deslizante

Fig. 1 – Aparato de corte directo



(a) Método logarítmico o de Casagrande



(b) Método de Taylor o de la raíz cuadrada del tiempo

Fig. 2 – Métodos gráficos para la determinación de la velocidad de rotura en ensayos drenados

$$L_0 = \quad L_{100} = \quad L_{50} = (L_0 + L_{100})/2 =$$

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

$$t_f = H^2 / 2 C_v (1-U_f) = \quad (U_f = 0,95)$$

d_f (desplazamiento estimado en mm) =

$V_{\text{máx.}}$ (velocidad máxima de rotura en mm/min) =

LECTURAS DE CONSOLIDACIÓN							
TIEMPOS	LECTURAS	TIEMPOS	LECTURAS	TIEMPOS	LECTURAS	TIEMPOS	LECTURAS
10 s		5 min		1 h		3 d	
15 s		7 min		2 h		5 d	
30 s		10 min		3 h		7 d	
45 s		15 min		5 h		10 d	
1 min		20 min		7 h			
2 min		30 min		1 d			
3 min		45 min		2 d			

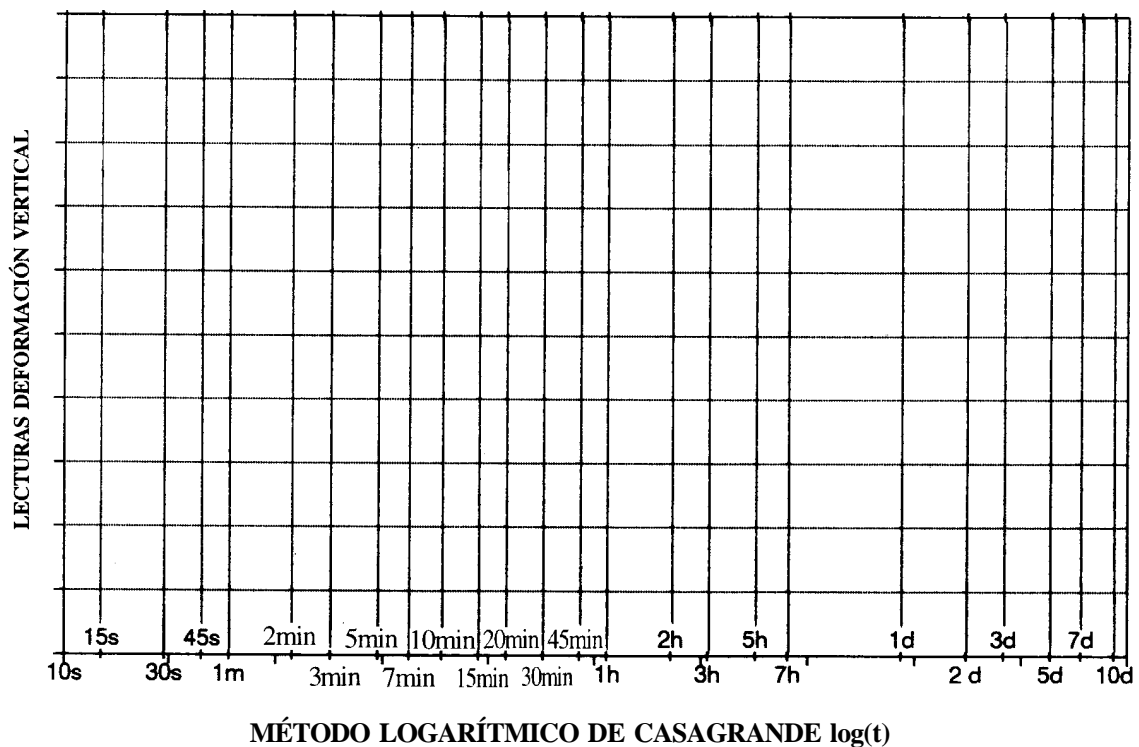


Fig. 3 – Modelo de impreso para expresión de resultados del método de Casagrande de determinación de la velocidad de rotura

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

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

$$t_f = H^2 / 2 C_v (1 - U_f) = \quad (U_f = 0,95)$$

$$d_f \text{ (desplazamiento estimado en mm)} =$$

$$V_{\max.} \text{ (velocidad máxima de rotura en mm/min)} =$$

$$t_{100} =$$

$$L_{50} = (L_0 + L_{100}) / 2 =$$

$$H = H_0 - (L_0 + L_{100}) / 2 =$$

$$t_f \text{ (método directo)} = 12,7 \times t_{100} =$$

LECTURAS DE CONSOLIDACIÓN					
TIEMPOS	LECTURAS	TIEMPOS	LECTURAS	TIEMPOS	LECTURAS
0 s		10 min		3 h	
15 s		15 min		5 h	
1 min		20 min		7 h	
2 min		30 min		9 h	
3 min		45 min		12 h	
5 min		1 h		1 d	
7 min		2 h		2 d	

MÉTODO DE TAYLOR (\sqrt{t}) Y MÉTODO DIRECTO

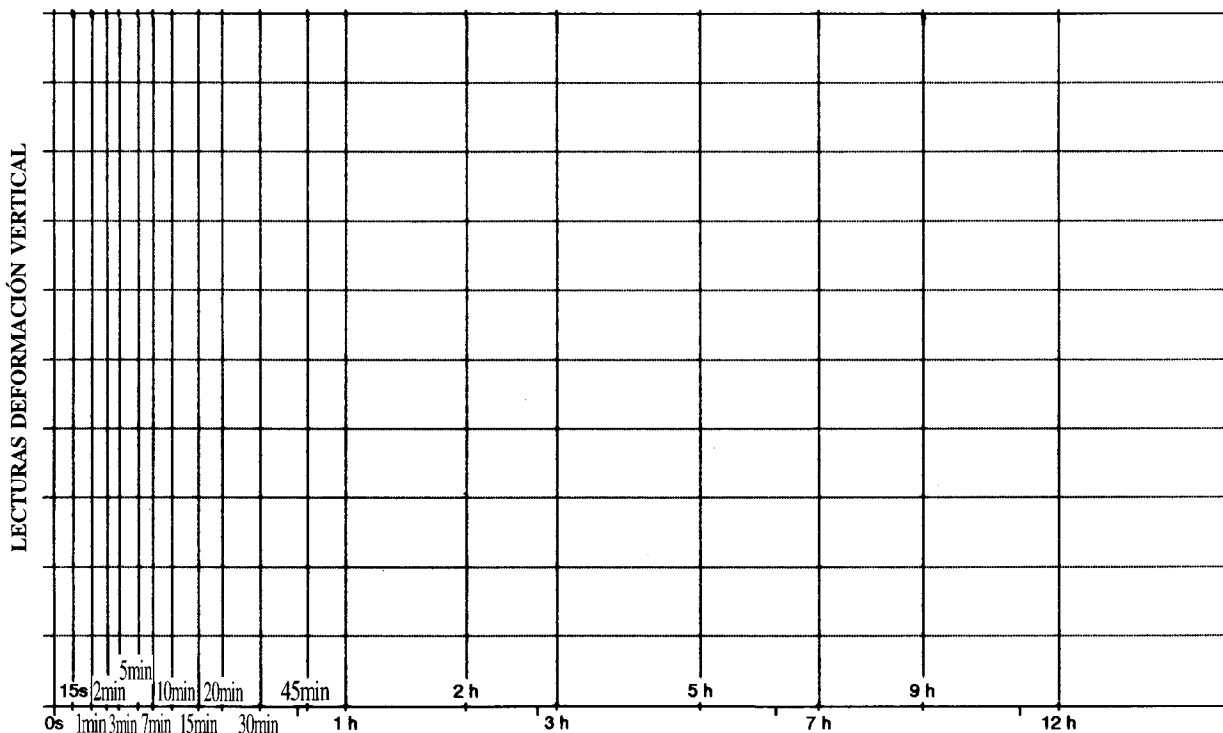


Fig. 4 – Modelo de impreso para expresión de resultados del método de Taylor y método directo de determinación de la velocidad de rotura

TRABAJO Nº = MUESTRA Nº = LOCALIZACIÓN
SONDEO Nº = PROFUNDIDAD (m)

MASAS Y DIMENSIONES DE LA CAJA DE CORTE	
MASAS	
masa mitad superior caja	$m_c(g) =$
masa del tallador	$m_t(g) =$
DIMENSIONES	
CAJA CUADRADA	CAJA CIRCULAR
dimensión interior caja	$L_1(mm) =$
dimensión interior caja	$L_2(mm) =$
altura tallador	$h_t(mm) =$
altura mitad superior caja	$h_c(mm) =$
Área inicial probeta	$A = L_1 \cdot L_2 (mm^2) =$
	diámetro interior caja $D(mm) =$
	altura mitad superior caja $h_c(mm) =$
	Área inicial probeta $A = (\pi \cdot D^2) / 4 (mm^2) =$
Volumen inicial probeta $V = A \cdot h / 1\,000 (cm^3)$ (h = altura inicial probeta)	

PREPARACIÓN DE LA PROBETA					
SUELOS COHESIVOS		SUELOS NO COHESIVOS			
INALTERADO	COMPACTADO	ARENA SECA FLOJA	ARENA SECA COMPACTA	ARENA SATURADA	ARENA SEMI-SATURADA
Tallado	Densidad seca $\rho_d (g/cm^3)$	Vertido	Compactación Dinámica	Hervido	Compactación Dinámica
	Energía $E(J/cm^3)$		Compactación Estática	Vacío	
			Vibración		
			Vertido		

DATOS DEL MONTAJE Y DE LA PROBETA
Distancia desde el borde superior de la caja hasta la placa base $h_1(mm) =$ Distancia desde el borde superior de la caja hasta la placa porosa (suelos cohesivos) $h_2(mm) =$ Distancia desde el borde superior de la caja hasta la placa ranurada (suelos no cohesivos) $h_3(mm) =$ Altura total de las placas utilizadas en el ensayo $h_t(mm) =$ Altura inicial probeta (suelos cohesivos) $h(mm) = h_1 - h_2 - h_t =$ Altura inicial probeta (suelos no cohesivos) $h(mm) = h_1 - h_3 - h_t =$ Distancia desde el borde superior del pistón de carga al borde superior de la caja $h_4(mm) =$ Distancia desde el borde superior del pistón de carga al borde superior de la caja con el yugo de cargas y en equilibrio $h_5(mm) =$ Asiento debido al yugo $h_4 - h_5(mm) =$ Masa húmeda inicial de la probeta $m_{hi}(g) =$ Masa seca inicial de la probeta $m_{di}(g) =$ Masa húmeda final de la probeta $m_{hf}(g) =$ Masa seca final de la probeta $m_{df}(g) =$

HUMEDADES Y DENSIDADES
Humedad inicial $W_i(\%) = 100 \cdot (m_{hi} - m_{di}) / m_{di} =$ Humedad final $W_f(\%) = 100 \cdot (m_{hf} - m_{df}) / m_{df} =$ Índice de huecos inicial $e_i = \rho_s / \rho_d - 1 =$ Índice de huecos $e = e_i \cdot \Delta h / h (1 + e_i) =$ (Δh = cambio altura (mm) de la probeta)
Densidad aparente $\rho (g/cm^3) = m_{hi} / V =$ Densidad seca $\rho_d (g/cm^3) = m_{di} / V =$ Densidad de las partículas $\rho_s (g/cm^3) =$ Grado de saturación inicial $S_i(\%) = (W_i \cdot \rho_s) / e_i =$

Fig. 5 – Modelo de impreso para expresión de los datos del ensayo

Velocidad de desplazamiento (mm/min) =

Tensión normal (kPa) =

[illegible]

Fig. 6 – Modelo de impreso para expresión de los datos de la rotura

TRABAJO N°

MUESTRA N°

SONDEO N°

PROFUNDIDAD (m)

LOCALIZACIÓN

Tipo de ensayo:

CD / CU / UU / RESIDUAL

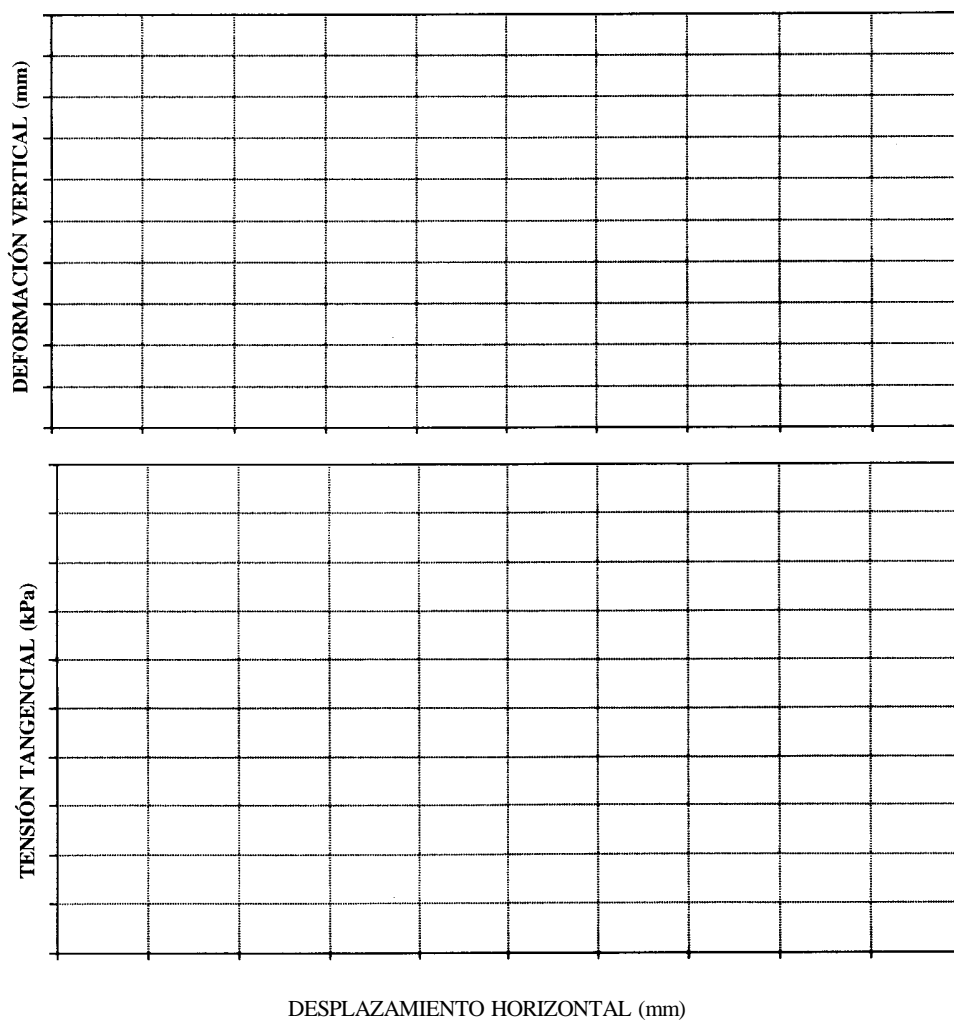
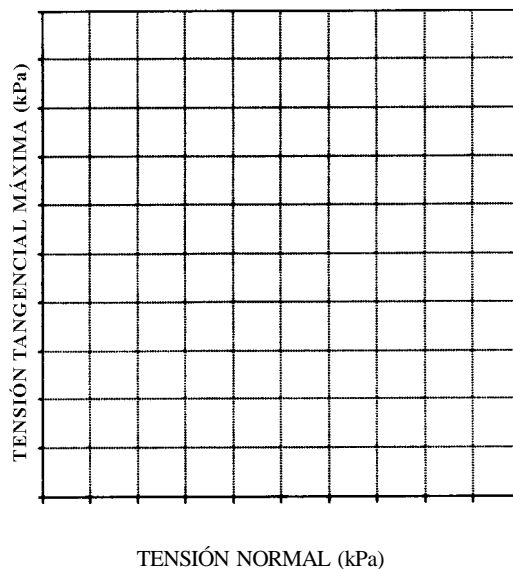


Fig. 7 – Modelo de impreso para la representación gráfica de resultados

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A UNIVERSIDAD POLITECNICA MADRID