

**DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE
MÉTODO DE CORTE DIRECTO (CD) (CONSOLIDADO DRENADO)**

I.N.V. E – 154 – 07

1. OBJETO

- 1.1** Esta norma tiene por objeto establecer el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo. El ensayo se podrá hacer con un corte sencillo o un corte doble como se ilustra en la Figura 1. Este ensayo se puede realizar sobre todos los tipos de suelos, ya sean muestras inalteradas o remoldeadas.

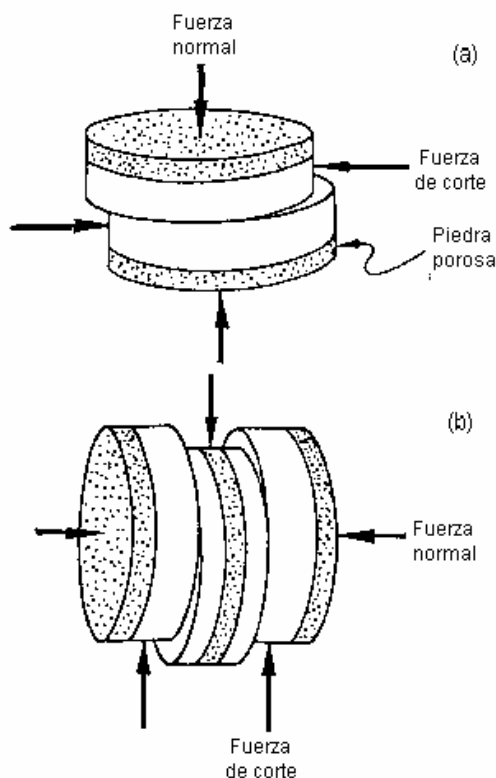


Figura 1. Esquema del ensayo del corte (a) sencillo y (b) del corte doble

- 1.2** Los resultados del ensayo son aplicables en situaciones de campo, en las cuales ha ocurrido la consolidación completa bajo la sobrecarga existente y se produce lentamente la falla, así que el exceso de las presiones de poros se disipa. El ensayo también es útil para la determinación en el material de la máxima resistencia al corte y de la resistencia residual a lo largo de planos conocidos de baja resistencia.

- 1.3 El resultado del ensayo puede ser afectado por presencia de partículas de roca en la superficie de falla que es inducida.
- 1.4 El ensayo no es apropiado para obtener relaciones exactas de esfuerzo-deformación (en la muestra de ensayo), debido a la distribución no uniforme de los esfuerzos de corte y de las deformaciones. El desplazamiento a velocidad lenta permitirá disipar el exceso de las presiones de poros y permitirá también el flujo plástico de los suelos cohesivos blandos. Se debe tener cuidado para que las condiciones del ensayo sean representativas de aquellas que se están investigando.
- 1.5 Los valores se deben expresar en unidades SI.
- 1.6 Esta norma no considera los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien la emplee establecer prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y determinar la aplicación de limitaciones regulatorias antes de su empleo.

2. RESUMEN DEL MÉTODO

El ensayo consiste en: (a) Colocación de la muestra de ensayo en el dispositivo de corte directo; (b) Aplicación de una carga normal determinada; (c) Disposición de los medios de drenaje y humedecimiento de la muestra; (d) Consolidación de la muestra bajo la carga normal; (e) Liberación de los marcos que sostienen la muestra; (f) Aplicación de la fuerza de corte para hacer fallar la muestra (véanse Figuras 1 y 2). Generalmente tres o más muestras son ensayadas, cada una bajo fuerza normal diferente, para determinar los efectos sobre la resistencia al corte y las deformaciones. El intervalo de las cargas normales usadas deberá ser el apropiado y en concordancia para las condiciones del suelo investigado.

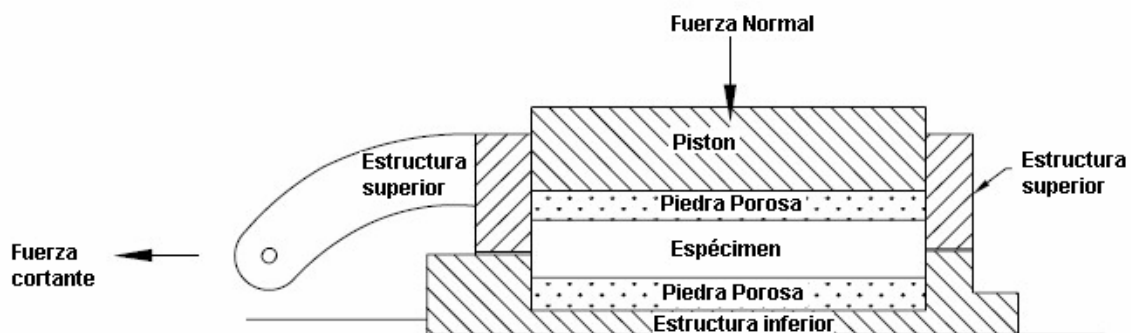


Figura 2. Dispositivo para el ensayo del corte directo

3. EQUIPO

3.1 *Aparato o Dispositivo de corte directo* – El dispositivo de corte directo deberá sostener la probeta con seguridad entre dos piedras porosas colocadas una en cada cara, de tal manera que no se presenten movimientos de torsión sobre ella. Debe estar provisto de los dispositivos necesarios para aplicar una fuerza normal en las caras de la muestra, para determinar los cambios en el espesor de la muestra, para permitir el drenaje del agua a través de las piedras porosas insertadas en el fondo y parte superior de la muestra y para sumergir la muestra en agua. El equipo debe ser capaz de aplicar y medir una fuerza de corte para hacer fallar la muestra a lo largo de un determinado plano (corte simple) o de determinados planos (corte doble), los cuales serán paralelos a las caras de la muestra y determinar los desplazamientos laterales de ésta. Los marcos que sostienen la probeta deben ser lo suficientemente rígidos para evitar su deformación durante el corte. Las diferentes partes del dispositivo deben ser de un material resistente a la corrosión por sustancias contenidas en el suelo o por la humedad del mismo.

3.2 *Caja de corte* – La caja de corte podrá ser redonda o cuadrada, deberá ser de acero inoxidable, bronce, o aluminio, con los aditamentos necesarios para el drenaje por la parte de arriba y por el fondo. La caja de corte deberá estar dividida por un plano horizontal que separa dos mitades de igual espesor, ésta deberá estar provista con tornillos de alineación o bloqueo. Adicionalmente la caja de corte también deberá poseer tornillos que controlen el espaciamiento entre el marco superior y el inferior.

3.3 *Piedras porosas* – Las piedras porosas deben ser de carburo de silicio, óxido de aluminio o de un metal que no sea susceptible a la corrosión por sustancias contenidas en el suelo o la humedad del mismo. La permeabilidad de la piedra porosa debe ser substancialmente mayor que el de la muestra, pero debe prevenir la intrusión excesiva de las partículas de muestra en los poros de la inserción. El diámetro de la piedra porosa en la parte superior de la muestra será de 0.2 mm a 0.5 mm menor del diámetro dentro del anillo. La piedra porosa también deberá ayudar a transferir el esfuerzo de corte a la muestra, por lo cual deberá ser lo suficientemente tosca para desarrollar un enclavamiento. El lavado con arena a presión o labrado con herramienta podrá preparar la superficie de la piedra porosa, pero la superficie de la inserción no debe ser demasiado irregular por que causaría concentraciones de esfuerzos en la muestra.

Nota 1.– No se tiene establecido un criterio estricto para textura y permeabilidad de las piedras porosas. Como referencia se puede establecer, que para muestras de suelos normales, la permeabilidad que se puede adoptar para las piedras porosas será de aproximadamente igual a 5.0×10^{-4} a 1.0×10^{-3} cm/s cuando se ensayen limos y arcillas y se podrá trabajar con piedras porosas con permeabilidad aproximadamente igual a 0.05 a 0.10 cm/s para cuando se ensayen arenas. Es importante que la permeabilidad de la piedra porosa no se reduzca por la acumulación de partículas de las muestras en los poros; la comprobación frecuente de esta característica y la limpieza, hirviéndolas o por métodos ultrasónicos, se requerirán periódicamente.

3.4 *Dispositivos de carga:*

3.4.1 *Dispositivo para la aplicación de la fuerza normal* – Debe estar capacitado para aplicar rápidamente la fuerza especificada sin excederla y para mantenerla con una variación máxima de ± 1 % durante el proceso de ensayo.

3.4.2 *Dispositivo para la aplicación de la fuerza de corte* – La capacidad depende más que todo del tipo de control: con control de deformaciones o con control de esfuerzos. Se prefiere, generalmente, el primero por la facilidad para determinar tanto el esfuerzo último como la carga máxima. El equipo con control de deformaciones debe tener la capacidad para cortar la muestra a una velocidad de desplazamiento uniforme, con una desviación de $\pm 5\%$ y debe permitir el ajuste de la velocidad de desplazamiento dentro de un rango que permita ajuste de la rata de desplazamiento de 0.0025 a 1.0 mm/min. La velocidad de aplicación de la carga, depende de las características de consolidación del suelo (ver Sección 6.8). Se logra usualmente por medio de un motor con caja de transmisión y la fuerza de corte se determina por medio de un indicador de carga, anillo calibrado o celda de carga.

3.4.3 El peso del marco de corte superior, en el caso que éste se apoye en el momento del corte sobre la muestra, deberá ser menor al 1% del valor de la fuerza normal aplicada, en el caso que no sea así se deberá tener en cuenta como parte de la fuerza normal aplicada o modificar este marco.

Nota 2.– El corte de la muestra de prueba a velocidad mayor que la especificada, puede producir resultados de corte parcialmente drenados que diferirán de los esfuerzos drenados en el material.

3.5 *Dispositivos para medir fuerza de corte* – Deberá poseer un medidor de fuerza de corte, el cual podrá ser un anillo calibrado o una celda de carga que tendrá precisión de 2.5 N (0.5 lbf) o al menos el 1% de la carga lateral de falla, cualquiera que sea más grande.

3.6 *Recipiente para caja de corte* – Caja metálica que soporte la caja de corte y produzca, bien sea, una reacción contra la mitad de la caja de corte que esta frenada o una base sólida con las guías para encuadrar la mitad de la caja de corte que esta libre de movimiento cuando la fuerza horizontal de corte es aplicada.

3.7 *Cuarto húmedo* – Tal que garantice que la pérdida de humedad durante la preparación de la muestra no exceda de 0.5 %, tanto para su almacenamiento como para su preparación.

3.8 *Anillos para el tallado de la muestra* – Deberán ser los adecuados para tallar la muestra de acuerdo con las dimensiones interiores de la caja de corte con un mínimo de alteración. Se puede necesitar un soporte exterior, para mantener en alineamiento axial, una serie de 2 o 3 anillos.

3.9 *Balanza* – Debe tener una sensibilidad de 0.1 g o 0.1 % de la masa de la probeta.

3.10 *Medidores de desplazamiento* – Deben ser adecuados para medir los cambios en el espesor de la muestra con una sensibilidad de 0.002 mm (0.0001") y para medir los desplazamientos laterales con una sensibilidad de 0.02 mm (0.001").

- 3.11 *Horno de secado* – Capaz de mantener la temperatura a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230^{\circ} \pm 9^{\circ}\text{F}$).
- 3.12 *Recipientes varios* – Para muestras de humedad, los cuales no deberán ser susceptibles a la corrosión ni al cambio de masa, ni a la desintegración por enfriamiento o calentamiento.
- 3.13 *Equipo para el remoldeo o compactación de probetas* – Será el adecuado para cada tipo de suelo y en concordancia con el objetivo investigado en el ensayo.
- 3.14 *Equipo misceláneo* – Incluyen cronómetro, sierra de alambre, espátula, cuchillos, enrrasadores, agua destilada y demás elementos necesarios para la correcta ejecución del ensayo.

4. PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

- 4.1 Si se usa una muestra inalterada, debe ser suficientemente grande para proveer un mínimo de tres probetas de ensayo idénticas y deberán ser tomadas de acuerdo a los procedimientos descritos en la norma INV E – 103 para los grupos C y D.
- 4.2 La preparación de la muestra se debe efectuar de tal manera que la pérdida de humedad sea insignificante.
- 4.3 La muestra se talla sobre medida para las dimensiones del dispositivo de corte directo.
- 4.4 Para muestras inalteradas de suelos sensibles, se debe tener extremo cuidado al labrar las muestras, para evitar la alteración de su estructura natural.
- 4.5 Se determina la masa inicial de la muestra para el cálculo posterior del contenido inicial de humedad de acuerdo con la norma INV E – 122.
- 4.6 Si se utilizan muestras de suelos compactados, la compactación se deberá hacer con las condiciones de humedad y densidad deseadas. Se puede efectuar directamente en el dispositivo de corte, en un molde de dimensiones iguales a las del dispositivo de corte o en un molde mayor para recortarlas de acuerdo con la Sección 4.3.
- 4.7 El diámetro mínimo de las muestras circulares o el ancho mínimo para muestras rectangulares debe ser alrededor de 50 mm (2"), pero no menor de diez veces el tamaño máximo de las partículas del suelo.

Nota 3. - Para minimizar las alteraciones causadas por el muestreo, el diámetro de las muestras para el ensayo, obtenidas de tubos muestradores, debe ser por lo menos 6 mm (1/4") menor que el diámetro del tubo.

- 4.8 El espesor mínimo de la muestra de ensayo, debe ser alrededor de 13 mm (1/2"), pero no menor de seis veces el tamaño máximo de las partículas del suelo.

- 4.9** La relación mínima diámetro/espesor o ancho/espesor, según la forma geométrica de la muestra, debe ser 2:1.

5. CALIBRACIÓN

- 5.1** Se ensambla el dispositivo de corte directo (sencillo) con un disco metálico de calibración, de espesor igual al de la muestra de ensayo deseada y alrededor de 5 mm (1/4") menor en diámetro.

Nota 4. - El dispositivo de corte doble, requiere dos discos de calibración.

- 5.2** Se coloca el indicador de desplazamiento normal en su posición habitual, se ajusta este indicador de tal manera que se pueda usar para medir tanto lecturas de consolidación como de expansión, para luego aplicar fuerzas normales iguales a las cargas que se van a utilizar en el ensayo.

- 5.3** Se registra la lectura del indicador de deformación normal, como una futura referencia para determinar, tanto el espesor de la muestra de ensayo, como la deformación desarrollada por el conjunto.

- 5.4** Adicionalmente se registra la lectura del indicador de deformación normal, en el proceso de descarga del disco de calibración, como una futura referencia para determinar, tanto el espesor de la muestra de ensayo, como la deformación desarrollada por el conjunto.

- 5.5** Luego, se retira el disco de calibración.

Nota 5. - Se puede aceptar cualquier otro método que permita la calibración exacta del aparato.

6. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

- 6.1** Se ensambla la caja de corte con los marcos alineados y se bloquea para no permitir efectos de corte prematuros en la muestra.

Se aplica una ligera capa de grasa entre los marcos para lograr impermeabilidad durante la consolidación y reducir la fricción durante el corte. También se pueden usar espaciadores o superficies recubiertas con teflón, para reducir la fricción durante el corte. Se introduce la muestra de ensayo con sumo cuidado. Se conectan los dispositivos de carga y se ajustan los medidores de desplazamiento lateral de corte, como los de cambio del espesor de la muestra, luego se determinará el espesor inicial de la probeta.

Nota 6. - La decisión de humedecer las piedras porosas antes de la colocación y aplicación de la fuerza normal sobre las muestras, dependerá del tipo de problema en estudio. Para muestras inalteradas obtenidas bajo el nivel freático, se deben humedecer las piedras. Para suelos expansivos se debe efectuar el humedecimiento después de la aplicación de la fuerza normal, para evitar expansiones que no son representativas de las condiciones de campo.

- 6.2** Se debe permitir la consolidación de la muestra bajo una fuerza normal adecuada y previamente escogida. Inmediatamente después y tan pronto como sea posible aplicar la fuerza normal predeterminada, se llena el depósito de agua hasta un nivel por encima de la muestra, permitiendo el drenaje y por lo tanto la consolidación. El nivel del agua se debe mantener durante la consolidación y en las fases siguientes de corte de tal manera que la muestra esté saturada en todo momento. Durante el proceso de la consolidación se deben registrar las lecturas de desplazamiento normal, en tiempos apropiados, antes de aplicar un nuevo incremento de la fuerza. Cada incremento de la fuerza normal debe durar hasta que se complete la consolidación primaria. El incremento final debe completar la fuerza o esfuerzo normal especificado. Se utilizará un procedimiento análogo y basándose en los mismos criterios que sean aplicables a los descritos en la norma INV E – 151, “Consolidación unidimensional de los suelos”. Se representan gráficamente las lecturas del desplazamiento o de la deformación normal contra el tiempo.

Nota 7.- La fuerza o esfuerzo normal que se aplique a la muestra o probeta depende de la información requerida de lo que se desea evaluar en el ensayo. Cuando se aplica éste esfuerzo, un solo incremento puede ser apropiado para suelos relativamente firmes. Para los demás suelos pueden ser necesarios varios incrementos de esfuerzo, hasta llegar al requerido, con el objeto de prevenir el daño de la muestra. El primer incremento dependerá de la resistencia y de la sensibilidad del suelo. En general, esta fuerza no debe ser tan grande que haga fluir el material constitutivo de la muestra por fuera del dispositivo de corte.

- 6.3** *Corte de la muestra* – Luego de terminada la consolidación se deben soltar los marcos desbloqueándolos y separándolos aproximadamente 0.25 mm (0.01"), para permitir el corte de la muestra.

Se debe aplicar la fuerza de corte lentamente para permitir la disipación completa del exceso de presión de poros. Para determinar la velocidad de aplicación de la carga hasta la falla, se podrá usar como herramienta la siguiente expresión:

$$t_f = 50t_{50}$$

donde:

t_f = tiempo calculado para la falla, y

t_{50} = tiempo requerido por la muestra para lograr el 50% de consolidación bajo la fuerza normal.

Nota 8.- Se debe garantizar que los tornillos de separación de los marcos de corte, luego de realizar su función y antes de iniciar el corte, se retraigan y no queden en contacto con el marco inferior. Además se deben remover los pines o tornillos usados para bloquear ambos marcos.

Cuando se realiza el ensayo por control de deformaciones, la velocidad de deformación se puede determinar aproximadamente, dividiendo la deformación de corte estimada para el máximo esfuerzo de corte por el tiempo estimado para la falla, como se indica al final de esta Sección. Se continúa el ensayo hasta que la muestra llegue a la falla, un criterio es cuando la muestra ya haya alcanzado su máximo esfuerzo de corte, frecuentemente se determina cuando el esfuerzo de corte se vuelve constante, el otro criterio es hasta cuando se

logre una deformación del 10% del diámetro o de la longitud original de la muestra. En el ensayo con control de esfuerzos, se comienza con incrementos de la fuerza de corte de aproximadamente un 10% de la máxima estimada. Antes de aplicar un nuevo incremento, se permitirá por lo menos un 95 % de consolidación bajo el incremento anterior. Cuando se ha aplicado del 50% al 70% de la fuerza de falla estimada, los nuevos incrementos serán de la mitad del valor de los aplicados hasta ese momento, o sea el 5% de la máxima fuerza de corte. En la proximidad de la falla, los incrementos de la fuerza pueden ser iguales a un cuarto del incremento inicial (2.5 % de la fuerza normal de corte estimada). Se debe llevar registro de la fuerza de corte aplicada y la deformación normal y de corte para intervalos convenientes de tiempo. Con preferencia, el incremento de la fuerza de corte debe ser continuo.

En el ensayo con control de deformaciones, la velocidad de aplicación de cargas (v_c) se puede determinar, aproximadamente, dividiendo el desplazamiento estimado de corte para la falla (d_f), por el tiempo calculado para la falla (t_f).

$$v_c = d_f/t_f$$

Como una guía para determinar, aproximadamente, d_f , el cual depende de muchos factores, se puede tomar como $d_f = 12$ mm para suelos normalmente consolidados y, $d_f = 5$ mm para suelos sobreconsolidados

- 6.4** Terminado el ensayo, se remueve la muestra completa de la caja de corte, en el caso de suelos cohesivos se deslizarán completamente los marcos uno sobre el otro para calificar la superficie de corte formada, luego se secará en el horno la muestra y se determinará la masa de los sólidos.

Nota 9. – Algunos suelos, tal como arena densa y arcilla sobreconsolidadas, pueden no mostrar buena definición de la curva en el tiempo establecido. Consecuentemente, el cálculo de t_f puede producir estimaciones inapropiadas del tiempo requerido para fallar bajo condiciones de drenaje. Para arcillas sobreconsolidadas, que son probadas bajo esfuerzos normales más bajos que la presión de pre-consolidación del suelo, se sugiere que el tiempo de falla estimado con el valor de t_{50} equivalga a uno obtenido bajo el comportamiento de una consolidación normal. En el caso de arenas limpias, se aproximará $t_f = 10$ min. y para arenas de más de 5% de finos, se aproximará $t_f = 60$ min. Los valores de t_f no son de obligatoriedad si se comprueba que se puede tomar otro valor de los especificados.

7. CALCULOS

Se debe determinar lo siguiente:

- 7.1** Contenido inicial de humedad.
- 7.2** Densidad seca inicial y densidad húmeda inicial.
- 7.3** Esfuerzos normales y de corte, que se calculan de la siguiente forma:
 - 7.3.1** Esfuerzo de corte nominal, que actúa en el espécimen:

$$t = F / A$$

donde:

t = esfuerzo nominal de corte, en kPa,

F = fuerza de corte, en N, y

A = área inicial del espécimen, en mm².

7.3.2 Esfuerzo normal que actúa en el espécimen:

$$h = N / A$$

donde:

h = esfuerzo normal, en kPa, y

N = fuerza normal que actúa sobre el espécimen, en N.

7.4 La velocidad de desplazamiento. Se calcula la velocidad de corte real dividiendo el desplazamiento relativo lateral por el tiempo transcurrido o se reporta la velocidad usada para la prueba.

$$dr = dh / te$$

donde:

dr = velocidad de desplazamiento, Mm/min,

dh = desplazamiento relativo lateral, mm, y

te = tiempo transcurrido de la prueba, min.

7.5 Las deformaciones o desplazamientos laterales y normales.

7.6 Relación de vacíos antes y después de la consolidación y después del ensayo de corte, si se desea.

7.7 Los grados de saturación inicial y final, si se desea.

8. INFORME

El reporte debe incluir lo siguiente:

8.1 Descripción del tipo de dispositivo utilizado en el ensayo.

8.2 Identificación y descripción de la muestra, incluyendo si el suelo es inalterado, remoldeado, compactado o preparado por otros medios, anotando cualquier característica no usual, referente por ejemplo a la estratificación.

- 8.3** Contenido inicial de agua.
- 8.4** Densidad seca inicial y densidad húmeda inicial.
- 8.5** Espesor inicial.
- 8.6** Se deben registrar todos los datos básicos del ensayo, incluyendo el esfuerzo normal, el desplazamiento normal, el desplazamiento de corte y los valores correspondientes a la resistencia al corte máximo y residual, cuando se indique.
- 8.7** Para cada probeta de ensayo se debe elaborar la curva esfuerzo de corte y deformación unitaria en un gráfico con escalas aritméticas y demás gráficos adicionales que sean requeridos según el fenómeno que se desee estudiar.
- 8.8** Se debe preparar, igualmente, un gráfico que incluya los valores para las tres probetas de las fuerzas normales contra la resistencia al corte y determinar, a partir del mismo, los valores efectivos del ángulo de fricción f' y de la cohesión, c' .
- 8.9** Se debe incluir el plan general de procedimiento, así como secuencias especiales de carga o requisitos especiales de humedad.

9. NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 3080 – 98

AASHTO T 236 – 03