

ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN CONDICIÓN CONSOLIDADA DRENADA (CD)

INV E – 154 – 13

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. La prueba se lleva a cabo deformando una muestra a velocidad controlada, cerca a un plano de corte determinado por la configuración del aparato de ensayo.
- 1.2** Los esfuerzos de corte y los desplazamientos no se distribuyen uniformemente dentro de la muestra y no se puede definir una altura apropiada para el cálculo de las deformaciones por corte. En consecuencia, a partir de este ensayo no es posible determinar las relaciones esfuerzo-deformación o cualquier otro valor asociado, como el módulo de corte.
- 1.3** La determinación de las envolventes de resistencia y el desarrollo de pautas para interpretar y evaluar los resultados del ensayo, se dejan a criterio del cliente que solicita el ensayo.
- 1.4** Los resultados del ensayo se pueden ver afectados por la presencia de partículas de suelo grueso o fragmentos de roca, o ambos (Ver la Sección 6).
- 1.5** Las condiciones del ensayo, incluyendo los esfuerzos normales y la humedad, se deberán escoger de manera que representen las condiciones de campo que se investigan. La velocidad de deformación debe ser suficientemente lenta para asegurar condiciones de drenaje equivalentes a una presión intersticial nula.
- 1.6** Generalmente, se ensayan tres o más especímenes, cada uno bajo una carga normal diferente para determinar su efecto sobre la resistencia al corte y al desplazamiento. Los resultados de una serie de ensayos se combinan para determinar propiedades de resistencia del suelo, como las envolventes de resistencia de Mohr.
- 1.7** Hay ocasiones en las cuales se debe incrementar el espacio vacío entre las dos mitades de la caja de corte para acomodar partículas de arena de tamaño mayor a dicho espacio. Hasta la fecha, no hay suficiente información

disponible para especificar el tamaño de ese vacío en función de la distribución de los tamaños de las partículas.

1.8 Esta norma reemplaza la norma INV E–154–07.

2 DEFINICIONES

2.1 Los siguientes términos son aplicables específicamente a esta norma:

2.1.1 *Falla* – Es la condición de esfuerzo en el instante de la falla de un espécimen de ensayo. Normalmente, se acepta que la falla corresponde al máximo esfuerzo de corte alcanzado o, en ausencia de una condición pico, al esfuerzo de corte cuando ha tenido lugar el 10 % de desplazamiento lateral relativo. Dependiendo del comportamiento del suelo y de la aplicación en el campo, se pueden definir otros criterios adecuados por parte de quien solicita la ejecución del ensayo.

2.1.2 *Esfuerzo normal nominal* – En el ensayo de corte directo, es la fuerza normal (vertical) aplicada, dividida por el área de la caja de corte. El área de contacto del espécimen en el plano de corte impuesto, decrece durante el ensayo y, por lo tanto, el verdadero esfuerzo normal es desconocido.

2.1.3 *Esfuerzo cortante nominal* – En el ensayo de corte directo, es la fuerza de corte aplicada, dividida por el área de la caja de corte. El área de contacto del espécimen en el plano de corte impuesto, decrece durante el ensayo y, por lo tanto, el verdadero esfuerzo cortante es desconocido.

2.1.4 *Desplazamiento lateral relativo* – Es el desplazamiento de la mitad superior (marco superior) de la caja de corte con respecto a la mitad inferior (marco inferior).

2.1.5 *Porcentaje de desplazamiento lateral relativo* – Relación, en porcentaje, entre el desplazamiento horizontal y el diámetro o dimensión lateral del espécimen en la dirección del corte.

2.1.6 *Precorte* – Corresponde a la etapa del ensayo luego de que el espécimen se ha estabilizado bajo la condición de la carga de consolidación, justamente antes de comenzar la fase de corte.

3 RESUMEN DEL MÉTODO

- 3.1** Este ensayo consiste en colocar el espécimen del ensayo en un dispositivo de corte directo, aplicar luego un esfuerzo normal determinado, humedecer y/ o drenar el espécimen de ensayo, consolidar el espécimen bajo el esfuerzo normal, desbloquear las mitades (marcos) de la caja de corte que contiene la muestra, y desplazar horizontalmente una mitad respecto de la otra a una velocidad constante de deformación, mientras se miden la fuerza de corte y los desplazamientos normales y horizontales (Figura 154 - 1). La velocidad de corte debe ser suficientemente lenta para permitir la disipación prácticamente total del exceso de presión de poros.

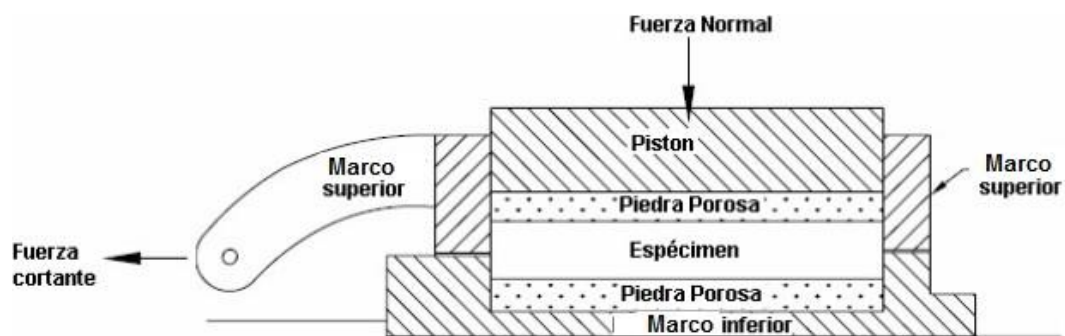


Figura 154 - 1. Caja para el ensayo de corte directo

4 IMPORTANCIA Y USO

- 4.1** El ensayo de corte directo es adecuado para la determinación, relativamente rápida, de las propiedades de resistencia de materiales consolidados y drenados. Debido a que las trayectorias de drenaje a través de la muestra son cortas, se permite que el exceso de presión en los poros se disipe con mayor rapidez que en otros ensayos drenados. El ensayo se puede realizar sobre cualquier tipo de suelo, inalterado, remoldeado o compactado. Hay, sin embargo, una limitación en relación con el tamaño máximo de partícula (Ver numeral 5.2).
- 4.2** Los resultados del ensayo son aplicables para estimar la resistencia al corte en una situación de campo donde ha tenido lugar una consolidación completa bajo los esfuerzos normales actuales. La falla ocurre lentamente bajo condiciones drenadas, de tal manera que se disipan los excesos de presión de poros. La velocidad de corte debe satisfacer los requisitos mencionados en el numeral 8.10. Se pueden utilizar los resultados de varios ensayos para expresar la relación entre los esfuerzos de consolidación y la resistencia al corte en condiciones drenadas.

Nota 1: El equipo especificado en esta norma no es apropiado para la ejecución de ensayos de corte en condición no drenada. El uso de una elevada velocidad de desplazamiento sin un control adecuado del volumen de la muestra se traduce en una drenaje parcial y, por lo tanto, en medidas incorrectas de los parámetros de corte.

- 4.3** Durante el ensayo de corte directo hay rotación de los esfuerzos principales, lo que puede o no corresponder a las condiciones de campo. Aun más, puede que la falla no ocurra en el plano más débil, puesto que ella es forzada a producirse en o cerca de un plano horizontal en la parte media del espécimen. La localización fija del plano de falla en el ensayo puede ser ventajosa en la determinación de la resistencia al corte a lo largo de planos débiles reconocibles dentro del material del suelo y para analizar las interfaces entre distintos materiales.
- 4.4** Los esfuerzos de corte y los desplazamientos no se distribuyen uniformemente dentro de la muestra y no se puede definir una altura apropiada para calcular las deformaciones de corte o cualquier otra cantidad asociada que sea de interés en los estudios geotécnicos. La baja velocidad de desplazamiento asegura la disipación de los excesos de presión de los poros pero, también, permite el flujo plástico de suelos cohesivos blandos.
- 4.5** El nivel del esfuerzo normal, de la velocidad de corte y las condiciones generales del ensayo, se deben seleccionar de manera que representen las condiciones específicas del suelo que se está investigando.
- 4.6** El área de la superficie de corte disminuye durante el desarrollo del ensayo. Esta disminución crea incertidumbre en relación con los valores reales de los esfuerzos normal y cortante sobre el plano de falla, pero no debería afectar la relación de estos esfuerzos.

5 EQUIPO

- 5.1** *Aparato de corte* – Instrumento diseñado y construido para contener de manera segura la muestra entre dos piedras porosas, de tal modo que no se aplique un momento de torsión a la muestra. El aparato de corte debe estar en condiciones de aplicar un esfuerzo normal a las caras del espécimen, medir el cambio de espesor del espécimen, permitir el drenaje del agua a través de las piedras porosas en las fronteras superior e inferior de la muestra y de sumergir la muestra en agua. El aparato debe ser capaz de aplicar una fuerza de corte al espécimen a lo largo de un plano de corte predeterminado (corte simple) paralelo a las caras de la muestra. Los marcos que contienen el espécimen deben tener la rigidez suficiente para prevenir su distorsión

durante el ensayo. Las diferentes partes del aparato de corte deben estar construidas con un material que no esté sujeto a la corrosión por humedad o por sustancias que se encuentren en el suelo; por ejemplo, pueden ser de acero inoxidable, bronce, aluminio, etc. No se permite la combinación de metales que puedan dar lugar a un efecto galvánico.

5.2 *Caja de corte* – Circular o cuadrada, de acero inoxidable, bronce o aluminio, con dispositivos para el drenaje a través de sus partes superior e inferior. La caja debe estar dividida por un plano recto en dos mitades de igual espesor, que se ajustan con tornillos de alineación. La caja está provista de tornillos de separación que controlan el espacio entre sus mitades superior e inferior antes del corte. Las dos mitades (marcos) deben proporcionar una superficie de soporte a la muestra a lo largo del plano de corte durante el desplazamiento lateral relativo.

5.2.1 El diámetro mínimo, en el caso de especímenes circulares, o el lado mínimo, en el caso de especímenes cuadrados, debe ser de 50 mm (2") y no menor de 10 veces el tamaño máximo de partícula, el que sea mayor de los dos.

5.2.2 El espesor mínimo inicial de la muestra debe ser de 13 mm (0.5"), pero no menor que 6 veces el tamaño máximo de partícula.

5.2.3 La relación mínima diámetro/espesor o lado/espesor, debe ser 2:1.

5.3 *Piedras porosas* – Las piedras porosas permiten el drenaje de la muestra de suelo a lo largo de sus caras superior e inferior. También, tienen como función transferir los esfuerzos a dichas caras. Las piedras porosas deben ser de carburo de silicio, óxido de aluminio o un metal que no esté sujeto a la corrosión por sustancias o por la humedad del suelo. El grado adecuado de la piedra depende del suelo que se vaya a analizar. La permeabilidad de las piedras debe ser sustancialmente mayor que la del suelo, pero su textura debe ser lo suficientemente fina para prevenir una intrusión excesiva del suelo en sus poros. El diámetro o ancho de la piedra porosa o de la platina superior, debe ser entre 0.2 y 0.5 mm (0.01 y 0.02") menor que la medida interior de la caja de corte. La piedra porosa tiene como función transferir esfuerzos horizontales al suelo y debe ser lo suficientemente rugosa para desarrollar adherencia por fricción. Este efecto se puede conseguir mediante chorro de arena o maquinado de la piedra; sin embargo, su superficie no debe ser tan irregular que cause grandes concentraciones de esfuerzos en el suelo. Las piedras porosas deben ser sometidas a inspecciones periódicas para prevenir su colmatación.

Nota 2: No se han establecido criterios exactos para definir la textura y la permeabilidad de las piedras porosas. Para un ensayo de suelo corriente, se consideran apropiadas las piedras de grado medio con una permeabilidad de, aproximadamente, 5×10^{-4} a 1×10^{-3} cm/s (0.5 a 1×10^3 pies/año) para analizar limos y arcillas; y piedras de grado grueso con una permeabilidad de 5×10^{-2} a 1×10^{-1} cm/s (0.5 a 1×10^5 pies/año) para arenas. Es importante que la permeabilidad de la piedra no se vea reducida por la acumulación de partículas de suelo en sus poros. El almacenamiento de las piedras en recipientes llenos de agua, entre uno y otro uso, disminuirá su colmatación. Son necesarios un examen y una limpieza frecuentes (por lavado, ebullición o agitación ultrasónica) para asegurar la permeabilidad necesaria de las piedras.

5.4 Mecanismos de carga:

5.4.1 Mecanismo para aplicar y medir la fuerza normal – La fuerza normal se puede aplicar con un marco de carga activado por pesas o mediante un mecanismo neumático de carga. El instrumento debe ser capaz de mantener la fuerza normal dentro de una variación de ± 1 % de la fuerza especificada. La aplicación de la carga debe ser rápida y sin exceder significativamente el valor establecido. Los sistemas de pesas se deben verificar con regularidad. Todos los sistemas de aplicación ajustable de la fuerza (por ejemplo, regulador neumático o motor con tornillo impulsado) requieren un dispositivo que indique la fuerza aplicada, tal como un anillo dinamométrico, una celda de carga o un sensor de presión.

5.4.2 Mecanismo para cizallar la muestra – El instrumento utilizado debe ser capaz de cizallar la muestra a una velocidad uniforme de desplazamiento, con una desviación menor de ± 5 %, y debe permitir el ajuste de la velocidad de desplazamiento desde 0.0025 a 1.0 mm/min (0.0001 a 0.04 pg./min), con el fin de permitir el ensayo de una amplia variedad de suelos. La velocidad que se aplique depende de las características de consolidación de los suelos (Ver numeral 8.10). Normalmente, la velocidad se mantiene con un motor eléctrico y un motorreductor, y la fuerza de corte se determina por medio de un instrumento indicador de carga, como una celda o un anillo de carga.

Nota 3: Cizallar la muestra a una velocidad mayor que la especificada puede producir resultados de corte en condición parcialmente drenada, los cuales difieren de los obtenidos bajo drenaje completo. La muestra deberá ser cizallada con la lentitud necesaria para permitir la disipación total de la presión de poros.

5.4.3 Marco superior de la caja de corte – El peso de la parte superior de la caja de corte debe ser menor de 1 % de la fuerza normal aplicada durante el corte. Esto puede requerir que la parte superior de la caja de corte sea soportada por una fuerza vertical de sentido contrario a la

gravitacional, que el equipo deba ser modificado, o que la muestra deba ser cizallada bajo una fuerza normal mayor.

- 5.5** *Instrumento de medición de la fuerza normal* – Cuando no se use nada diferente a las pesas para aplicar la fuerza normal, se requiere un anillo de carga o una celda de carga (o un sensor de presión calibrado cuando se emplee un sistema de carga neumático), con precisión de 2.5 N (0.5 lbf) o 1 % de la fuerza normal aplicada durante el corte, lo que sea mayor.
- 5.6** *Instrumento de medición de la fuerza de corte* – Un anillo de carga o celda de carga con precisión de 2.5 N (0.5 lbf) o 1 % de la fuerza de corte en condiciones de falla, lo que sea mayor.
- 5.7** *Indicadores de deformación* – Diales o transductores capaces de medir el cambio de espesor del espécimen con precisión de no menos de 0.002 mm (0.0001"), y de medir el desplazamiento lateral relativo con precisión no menor de 0.02 mm (0.001").
- 5.8** *Cubeta de la caja de corte* – Una caja metálica que soporte la caja de corte y suministre ya sea una reacción contra la que se restringe la mitad inferior de la caja de corte, o una base sólida que permita la alineación de dicha mitad. La cubeta debe permanecer libre para moverse en la dirección de la fuerza de corte aplicada en el plano horizontal. La cubeta sirve, también, como recipiente del agua utilizada para sumergir el espécimen.
- 5.9** *Cuarto de humedad controlada* – Si se requiere, para preparar las muestras de modo que sus variaciones de humedad sean minimizadas.
- 5.10** *Agua para el ensayo* – Se necesita para saturar las piedras porosas y llenar el recipiente de inmersión. Idealmente, el agua debería ser similar a la contenida en los poros de la muestra que se va a ensayar. Si no es posible obtener un agua de dichas características, resulta aceptable el uso de agua potable del grifo, de agua desmineralizada o, inclusive, de agua salina. El cliente deberá especificar el tipo de agua por emplear. Si no lo hace, el ensayo se deberá realizar empleando agua del grifo.
- 5.11** *Anillo para desbastar o cortar las muestras* – Para ajustar las muestras sobredimensionadas, con un mínimo de alteración, a las dimensiones interiores de la caja de corte. Se puede necesitar, también, una plantilla posicionadora exterior, para mantener el alineamiento de la muestra con la caja de corte.

- 5.12 Balanzas** – Con posibilidad de lectura de 0.1 % o mejor.
- 5.13 Equipo para la determinación del contenido de agua** – De acuerdo con lo especificado en la norma INV E-122.
- 5.14 Equipo para compactar las muestras** – Cuando sea aplicable, se utilizará el especificado en las normas INV E-141 o INV E-142.
- 5.15 Equipo misceláneo** – Incluye un cronómetro con segundero, espátulas, cuchillos, regla, sierras de alambre, etc.

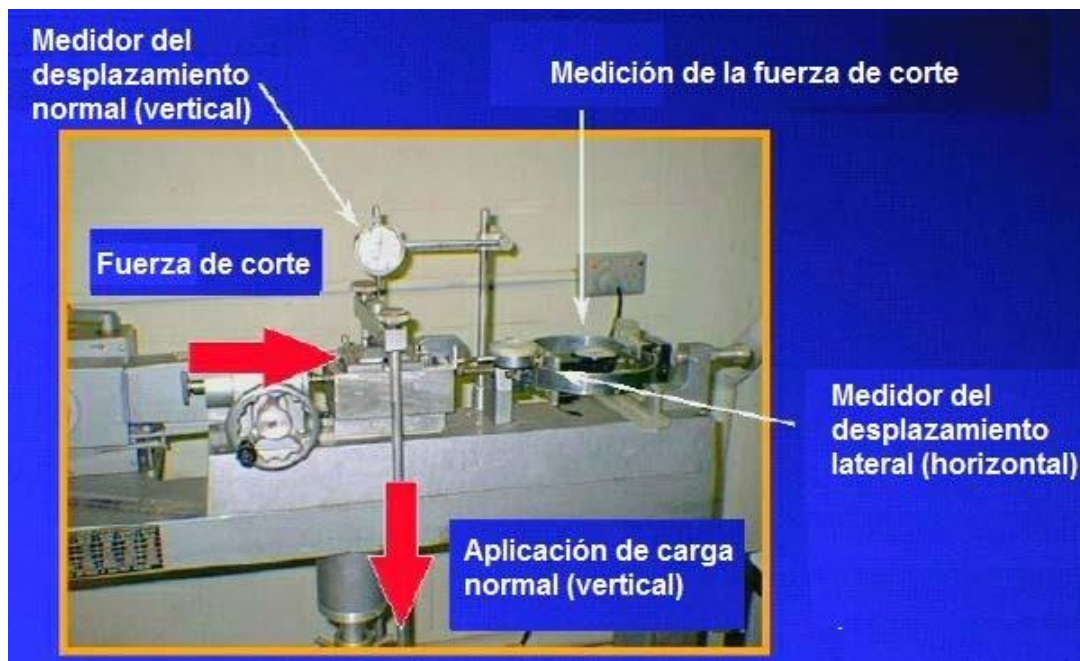


Figura 154 - 2. Montaje general del equipo de corte directo

6 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

- 6.1 Muestras inalteradas** – Los especímenes se deben preparar a partir de muestras grandes inalteradas o de muestras obtenidas de acuerdo con la norma INV E-105 u otros procedimientos de muestreo inalterado con tubos. Las muestras inalteradas se deben preservar y transportar como se define para las muestras de los grupos C o D en la norma INV E-103. Los especímenes se deben manejar con cuidado para minimizar la alteración, los cambios en la sección transversal o la pérdida de humedad. Si hay lugar a compresión o cualquier otro tipo de alteración notoria a causa del uso del extractor, el tubo de muestreo se deberá partir longitudinalmente o cortar en secciones

pequeñas para facilitar la remoción del espécimen con un mínimo de alteración. Siempre que sea posible, la preparación de las muestras recortadas se deberá realizar en un ambiente que minimice los cambios de humedad del espécimen.

- 6.1.1** La muestra utilizada en la preparación del espécimen debe ser suficientemente grande, de manera que se puedan preparar, por lo menos, tres especímenes similares. Aunque esta norma está escrita haciendo referencia al ensayo de un solo espécimen, todas las muestras se deberán ensayar de la misma manera.
- 6.1.2** Se debe tener mucho cuidado al preparar los especímenes inalterados de suelos sensitivos, para prevenir la alteración de la estructura natural del suelo.
- 6.1.3** Se ensamblan las dos mitades de la caja de corte y se determina la masa de ésta. Se labran los lados del espécimen para que ajuste sin holgura dentro de la caja. Una vez que el espécimen se encuentre dentro de la caja, se labran sus superficies superior e inferior para queden planas y paralelas.
- 6.1.4** Se determinan y anotan la masa inicial de la caja con el espécimen y la altura de éste, para usarlas en el cálculo de la humedad inicial y la densidad total del material.

Nota 4: Si se encuentran partículas de suelo grandes en la muestra después del ensayo, se debe hacer un análisis granulométrico de acuerdo con la norma INV E-123 para confirmar la observación visual; los resultados de este ensayo deben ser incluidos en el informe del ensayo.

Nota 5: Es deseable contar con un cuarto con una humedad alta y controlada, para tener un ambiente adecuado para el corte y labrado de las muestras.

- 6.2** *Especímenes fabricados en el laboratorio* – Los especímenes se pueden fabricar por reconstitución (Ver numeral 6.3) o por compactación (Ver numeral 6.4). Se debe disponer de material suficiente para realizar el programa completo de ensayos. El material se debe mezclar para asegurar su uniformidad y, de ser necesario, se divide en porciones apropiadas para cada contenido de agua que se requiera. Se mezcla el suelo con suficiente agua para producir la humedad deseada y se permite que el material húmedo se estabilice antes de preparar el espécimen, de acuerdo con la siguiente guía:

CLASIFICACIÓN POR EL SISTEMA UNIFICADO (NORMA INV E-181)	PERIODO MÍNIMO DE ESTABILIZACIÓN (HORAS)
SW, SP	No hay requisitos
SW-SM, SP-SM, SM	3
SC, ML, CL, SP-SC	18
MH, CH	36

6.3 *Especímenes reconstituidos* – Se deberán preparar utilizando el método de compactación y el contenido de agua y la densidad prescritos por el cliente que solicita el ensayo. Los especímenes se pueden moldear bien sea por amasado o impacto de cada capa, hasta que la masa acumulada del suelo colocado en la caja de corte queda compactada/reconstituida a un volumen conocido, o ajustando el número de capas, los golpes por capa y la energía por golpe. La parte superior de cada capa debe ser escarificada antes de la adición del material para la siguiente. Los límites entre capas compactadas se deben ubicar de manera que no coincidan con el plano de corte definido por las mitades de la caja de corte, a menos que éste sea el objetivo establecido para un ensayo en particular. El compactador utilizado para densificar el material debe tener un área de contacto con el suelo igual o menor al 50 % del área del molde.

6.3.1 Se aseguran las dos mitades de la caja de corte y se ensambla ésta en su soporte (Ver numeral 5.8). Se coloca una piedra porosa húmeda en el fondo de la caja de corte. Se determina la masa de suelo húmedo necesaria para formar una capa y se la coloca dentro de la caja. Se distribuye el suelo de manera uniforme y se compacta hasta alcanzar la condición deseada. Se continúan colocando y compactando capas, hasta que se logre la reconstitución completa del espécimen.

Nota 6: El espesor requerido de la capa compactada se puede determinar midiendo directamente el espesor de la capa o las marcas dejadas en la varilla de compactación, correspondientes al espesor de la capa que se está colocando.

6.3.2 Se determinan y anotan la altura y la masa inicial del espécimen.

6.3.3 Se coloca otra piedra porosa húmeda sobre la superficie del espécimen.

- 6.4** *Especímenes compactados* – Los especímenes de ensayo se pueden preparar, también, mediante los equipos y procedimientos de compactación descritos en las normas INV E–141 e INV E–142, luego de lo cual se cortan y colocan en la caja de corte, como si se tratara de muestras inalteradas. El plano de cizalladura del espécimen de corte directo no deberá estar alineado con ninguno de los planos de compactación de la muestra.

7 CALIBRACIÓN

- 7.1** La calibración es la operación mediante la cual se determina la deformación del aparato cuando se somete a la carga de consolidación, de manera que para cada carga de consolidación, la deflexión del aparato puede ser sustraída de las deformaciones observadas. En consecuencia, sólo se deberá registrar la deformación debida a la consolidación de la muestra para los ensayos completos. La calibración de las características de carga-deformación se debe llevar a cabo cuando el aparato se pone en servicio por primera vez o cuando se cambian partes del mismo. Los pasos que se describen a continuación brindan un método para la calibración del aparato. Sin embargo, se pueden emplear otros métodos que tengan una exactitud comprobada.
- 7.2** Se arma el aparato de corte directo con un disco o placa metálica de calibración, de espesor aproximadamente igual al del espécimen de ensayo típico, y con un diámetro o ancho ligeramente menor que el de la caja de corte.
- 7.3** Se ensambla el mecanismo de aplicación de la carga normal (vertical) y se aplica una carga que produzca una presión de 5 kPa (1 lbf/pg²).
- 7.4** Se coloca en posición el indicador de desplazamiento normal (vertical) y se ajusta de manera que pueda ser utilizado para medir consolidación o expansión a partir de las lecturas del disco o placa de calibración. Se registra la lectura cero o “sin carga”.
- 7.5** Se aplican incrementos de fuerza normal hasta alcanzar la capacidad del equipo, y se anotan las lecturas de los indicadores de desplazamiento normal y de fuerza normal. Se libera la carga vertical en secuencia inversa a la de aplicación y se anotan las lecturas respectivas de los indicadores de desplazamiento normal y de fuerza normal. Se promedian los valores y se dibuja un gráfico que relacione las deformaciones con los valores de la fuerza normal. Estos resultados se deben conservar para futuras referencias en la

determinación del espesor del espécimen de ensayo y en la compresión dentro del mismo aparato.

- 7.6** Si la corrección por deformación excede de 0.1 % de la altura inicial del espécimen para cualquier nivel de la carga durante el ensayo, se deberá aplicar la corrección a todas las medidas del ensayo.

8 PROCEDIMIENTO

- 8.1** Se ensamblan la caja de corte y la cubeta en el marco de carga.

- 8.1.1** *Muestra inalterada* – Se colocan las piedras porosas húmedas sobre las superficies expuestas del espécimen en la caja de corte y se coloca ésta con el espécimen inalterado y las piedras porosas en la cubeta y se alinea la cubeta en el marco de carga.

Nota 7: La decisión de saturar las piedras porosas o de usar piedras secas, depende de las características del problema que se esté estudiando. Normalmente, las piedras porosas son saturadas cuando se analizan muestras inalteradas obtenidas por debajo del nivel freático. En el caso de suelos expansivos, la secuencia de consolidación, humedecimiento y corte, previene la expansión hasta que el espécimen es equilibrado bajo el esfuerzo normal final

- 8.1.2** *Especimen reconstituido* – Se coloca y alinea el ensamble constituido por la caja de corte, la muestra, las piedras porosas y la cubeta en el marco de carga.

Nota 8: En algunos aparatos, la mitad superior de la caja de corte se mantiene en su lugar mediante una varilla con muescas que se ajusta a un agujero en la misma mitad superior de la caja de corte. La mitad inferior de la caja de corte se fija a la cubeta mediante tornillos. En algunos aparatos, la mitad superior de la caja de corte se mantiene en su lugar mediante una platina de anclaje.

- 8.2** Se conecta y ajusta la posición del sistema de carga de corte, de modo que no transmita fuerza sobre el instrumento de medición de carga. Se pone en cero este instrumento y se anota dicho valor.
- 8.3** Se conecta y ajusta el instrumento de medición de desplazamiento horizontal. Se hace una lectura inicial o se ajusta el instrumento de medición, indicando el desplazamiento cero.
- 8.4** Se coloca la placa de transferencia de carga y de interrupción del momento sobre la piedra porosa colocada en la parte superior del espécimen.

8.5 Se coloca el marco de carga de fuerza normal en posición, y se ajusta de modo que la barra de carga quede alineada. Si se utiliza un sistema de carga por palancas, se nivela la palanca. En los sistemas de carga neumática o accionados por motor, se ajusta el marco de carga hasta que asiente suavemente en la depresión de la placa de transferencia de carga, o se coloca una esfera metálica sobre la placa de transferencia y se ajusta el marco hasta lograr un contacto adecuado.

8.6 Se aplica una pequeña carga normal al espécimen. Se verifica que todos los componentes del sistema de carga estén ajustados y alineados, de manera tal que no quede restringido el movimiento de la placa de transferencia de carga en la caja de corte. El espécimen no debe experimentar una consolidación significativa bajo esta carga de ajuste.

Nota 9: La carga normal aplicada al espécimen debe ser suficiente para asegurar que todos los componentes están en contacto y alineados, pero no tan alta que le cause compresión a la muestra. Para la mayoría de las aplicaciones, resulta adecuada una carga que genere una presión de 5 kPa (1 lbf/pg²) pero, dependiendo de la finalidad del ensayo, pueden resultar aceptables otros valores.

8.7 Se fija y ajusta el instrumento de medición del desplazamiento vertical. Se obtiene una lectura inicial, junto con una lectura de la carga normal (tomada con un instrumento de medida o verificando las pesas colocadas).

8.8 *Consolidación* – La carga normal para la consolidación final se puede aplicar en uno o varios incrementos, dependiendo del tipo de material, de la rigidez del espécimen y de la magnitud del esfuerzo final. Los incrementos deben ser suficientemente pequeños para prevenir la extrusión del material por los contornos de las piedras porosas. En el caso de suelos cohesivos duros o materiales granulares, se acepta que la carga se aplique en su totalidad en una sola operación. En el caso de los materiales blandos, puede resultar necesario limitar la relación de incremento de carga a una unidad, como se describe en la norma INV E-151, y aplicar varios incrementos de carga intermedios. Con base en estas consideraciones y en los requerimientos del cliente, se debe calcular y anotar la fuerza normal requerida para alcanzar cada nivel de esfuerzo normal intermedio, a medida que el espécimen progresa desde la carga de ajuste hasta el esfuerzo normal de consolidación final.

8.8.1 Se aplica el primer incremento de carga y, si se requiere, se llena la cubeta con agua y se mantiene llena durante todo el ensayo. A falta de una especificación, la cubeta se deberá llenar con agua potable.

Nota 10: La saturación del espécimen elimina las presiones de poros negativas causadas por tensión superficial y previene el secado por evaporación durante el ensayo.

- 8.8.2** Para cada nivel intermedio de esfuerzo, la carga se debe aplicar tan rápido como resulte práctico. Cada nivel de carga se debe mantener hasta completar esencialmente la consolidación primaria, lo que se determina ya sea: (1) por interpretación de la relación tiempo-deformación normal (vertical); (2) por experiencia con el material, o (3) un valor por defecto a las 24 h. Se anota la deformación normal (vertical) al final de cada incremento, así como el lapso para alcanzarla.
- 8.8.3** Para el máximo y para el último nivel de esfuerzo normal, la carga se aplica con la mayor rapidez posible, e inmediatamente se comienzan a registrar las lecturas de las deformaciones normales (verticales), relacionándolas con el tiempo transcurrido. La norma INV E-151 provee detalles sobre el procedimiento de aplicación de la carga y sugerencias para llevar los registros. Para estos incrementos de carga, se debe verificar la conclusión de la consolidación primaria antes de proceder al próximo paso del ensayo, interpretando el dibujo del desplazamiento normal contra el logaritmo del tiempo o contra la raíz cuadrada del tiempo (en minutos). La norma INV E-151 suministra información en relación con la interpretación por ambos métodos.
- 8.8.4** Si la especificación del ensayo requiere la consolidación a un esfuerzo específico y luego retroceder a un nivel menor antes de proceder a la cizalladura, entonces el esfuerzo máximo se deberá mantener al menos durante un ciclo de compresión secundaria.
- 8.8.5** Si el material exhibe tendencia a la expansión bajo el esfuerzo normal máximo, el suelo se debe inundar, permitiéndole alcanzar el equilibrio (esencialmente detener la expansión) bajo este esfuerzo normal, antes de continuar con el siguiente paso del ensayo.
- 8.9** Justo antes de la cizalladura y después de que ha tenido lugar la consolidación primaria, se anota el desplazamiento normal de precorte y se remueven los tornillos de alineamiento o los pines de la caja de corte. Usando los tornillos de separación, se abre el espaciamiento entre las mitades de la caja de corte hasta, aproximadamente, el tamaño máximo de partícula del espécimen de ensayo o hasta 0.64 mm (0.025"), como un mínimo por defecto para suelos de grano fino. Se retiran los tornillos de separación luego de crear el espacio.

Nota 11: En la mayoría de los equipos, los tornillos de separación elevan la mitad superior de la caja separándola de la inferior. La creación de la separación de esta manera se traduce en un incremento en el esfuerzo de tensión a lo largo de la superficie potencial de falla. Esto puede debilitar involuntariamente el material.

8.10 *Determinación de la velocidad de corte* – El espécimen se debe someter a corte a una velocidad relativamente reducida, para que el exceso de presión de poros sea insignificante en la falla. La determinación de la velocidad apropiada de desplazamiento requiere una estimación del tiempo requerido para la disipación de la presión de poros y del monto de la deformación requerida para alcanzar la falla. Estos dos factores dependen del tipo de material y de la historia de esfuerzos. Se pueden usar los procedimientos que se describen enseguida para calcular la velocidad de corte requerida. Los numerales 8.10.1 y 8.10.2 se pueden usar para calcular tiempos hasta la falla cuando el máximo incremento de consolidación produce curvas deformación- tiempo bien definidas y el material tiene una baja relación de pre- consolidación. El numeral 8.10.3 provee valores por defecto que se pueden usar en otras situaciones.

8.10.1 Cuando los datos para el máximo incremento de consolidación producen una curva deformación normal–logaritmo del tiempo bien definida que se extiende dentro de la compresión secundaria, la curva se deberá interpretar como en la norma INV E–151, y el tiempo para alcanzar la falla se debe calcular con la ecuación:

$$t_f = 50 \times t_{50} \quad [154.1]$$

Donde: t_f : Tiempo total estimado para alcanzar la falla, min;

t_{50} : Tiempo requerido para que el espécimen alcance el 50 % de consolidación bajo el máximo incremento de esfuerzo normal, min.

8.10.2 Cuando los datos para el máximo incremento de consolidación no satisfacen los requerimientos del numeral 8.10.1, pero dan lugar a una curva “deformación normal-raíz cuadrada del tiempo” bien definida, la curva se deberá interpretar como en la norma INV E–151, y el tiempo hasta la falla se debe calcular con la ecuación:

$$t_f = 11.6 \times t_{90} \quad [154.2]$$

Donde: t_{90} : Tiempo requerido para que el espécimen alcance el 90 % de consolidación bajo el máximo incremento de esfuerzo normal, min.

- 8.10.3** Cuando los datos para el máximo incremento de consolidación no satisfacen los requerimientos de los numerales 8.10.1 u 8.10.2, o cuando el espécimen es significativamente preconsolidado bajo el máximo esfuerzo de consolidación, se deberán computar valores por defecto del tiempo para alcanzar la falla, a partir de un coeficiente de consolidación del suelo normalmente consolidado. La siguiente tabla suministra esos valores por defecto.

CLASIFICACIÓN POR EL SISTEMA UNIFICADO (NORMA INV E-181)	TIEMPO MÍNIMO HASTA LA FALLA (t_f)
SW, SP	10 min
SW-SM, SP-SM, SM	60 min
SC, ML, CL, SP-SC	200 min
MH, CH	1440 min

Nota 12: Los valores tabulados se basan en estimaciones de valores típicos del coeficiente de consolidación de suelos normalmente consolidados, con una trayectoria de drenaje de 1 cm. Cualquier suelo puede apartarse considerablemente de estos valores típicos. Las interpretaciones de la raíz cuadrada del tiempo pueden conducir a tasas de consolidación rápidas y erróneas de suelos parcialmente saturados o muy duros. El corte sobre especímenes sobreconsolidados ablanda el material en la zona de cizalladura, causando una reducción del coeficiente de consolidación. Consecuentemente, el cálculo de t_f a partir de las curvas deformación-tiempo puede dar lugar a una estimación incorrecta del tiempo requerido para la falla del espécimen en condición drenada. En el caso de las arcillas sobreconsolidadas que se ensayan bajo esfuerzos normales inferiores a la presión de pre-consolidación, se sugiere estimar el tiempo hasta la falla usando un valor t_{50} basado en el coeficiente de consolidación en el rango normalmente consolidado del suelo. Se debe tener cuidado, si al interpretar la curva del tiempo se obtienen tiempos considerablemente inferiores a los tabulados.

- 8.10.4** Se estima el desplazamiento lateral relativo requerido para llevar el espécimen a la falla. Este desplazamiento depende de muchos factores, incluidos el tipo de material y la historia de esfuerzos. En ausencia de experiencia específica sobre las condiciones del ensayo, se recomienda usar, como guía, $d_f = 10$ mm (0.5") si el material es un suelo fino normalmente consolidado o ligeramente pre-consolidado; en los demás casos, se debe usar $d_f = 5$ mm (0.2").

- 8.10.5** Se determina la velocidad de desplazamiento máximo apropiada, con la ecuación:

$$R_d = \frac{d_f}{t_f} \quad [154.3]$$

Donde: R_d : Velocidad de desplazamiento, mm/min (pg./min);

d_f : Desplazamiento lateral relativo estimado en la falla, mm (pg.).

8.11 Corte drenado – Para algunos tipos de aparatos, la velocidad de desplazamiento se logra utilizando combinaciones de piñones y posiciones de palancas. En otros tipos, la velocidad de desplazamiento se consigue ajustando la velocidad del motor. Se elige y anota una velocidad de desplazamiento que sea igual o menor a la obtenida al aplicar la ecuación del numeral 8.10.5.

8.11.1 Se registran el tiempo inicial, el desplazamiento normal (vertical), el desplazamiento lateral relativo (horizontal) y las fuerzas normal y cortante.

8.11.2 Se pone en funcionamiento el aparato y se inicia el proceso de corte.

8.11.3 Se toman lecturas de los datos de tiempo, desplazamiento vertical y horizontal y la fuerza de corte a los intervalos deseados de desplazamiento o de tiempo. Las lecturas se deben tomar lo más a menudo que sea posible, para definir con exactitud una curva desplazamiento-esfuerzo cortante. Como mínimo, se deben tomar datos para desplazamientos laterales relativos de 0.1 %, 0.2 %, 0.3 %, 0.4 %, 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 %, 2.5 %, 3.0 %, y luego cada 2 % adicional de desplazamiento lateral relativo, hasta el final del ensayo.

Nota 13: Puede ser útil hacer lecturas adicionales, especialmente al inicio del ensayo, para identificar tendencias de comportamiento y el valor del esfuerzo cortante máximo de materiales sobreconsolidados o frágiles.

8.11.4 Puede ser necesario suspender el ensayo y separar nuevamente las mitades de la caja de corte para mantener el espacio entre ellas.

8.11.5 El espécimen debe ser sometido a corte hasta, al menos, el 10 % de desplazamiento lateral relativo, a menos que el cliente haya establecido un criterio específico de finalización. Se detiene el dispositivo que genera la fuerza de corte.

Nota 14: La forma de la curva desplazamiento-fuerza cortante dependerá del tipo de suelo y de la historia de esfuerzos. La curva puede tener un pico bien definido o puede crecer monotónicamente a través del ensayo. En general, es mejor continuar el ensayo hasta una deformación mayor, que terminarla con base en la variación de la fuerza de corte.

8.11.6 Se remueve la fuerza normal del espécimen y se desarma el aparato de carga.

8.12 Cuando se trate de especímenes cohesivos, se separan las mitades de la caja de corte con un movimiento deslizante a lo largo del plano de falla. No se deben separar las mitades de la caja de corte perpendicularmente a la superficie de falla, puesto que dicho movimiento puede dañar el espécimen. Se fotografía, dibuja o describe por escrito la superficie de falla. Este procedimiento no se aplica a los especímenes no cohesivos.

8.13 Se retira el espécimen de la caja de corte y se determina su humedad, de acuerdo con el método de la Norma INV E-122. Si aplica, se recoge el material extraído en un recipiente separado para determinar su masa.

9 CÁLCULOS

9.1 Se calcula el esfuerzo cortante nominal actuante sobre el espécimen, con la ecuación:

$$\tau = \frac{F_s}{A} \quad [154.4]$$

Donde: τ : Esfuerzo cortante nominal, kPa (lbf/pg²) (3 dígitos significativos);

F_s : Fuerza de corte, kN (lbf) (3 dígitos significativos);

A : Área de la caja de corte, m² (pg²) (3 dígitos significativos).

9.2 Se calcula el esfuerzo normal nominal actuante sobre el espécimen, con la ecuación:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A} \quad [154.5]$$

Donde: σ_n : Esfuerzo normal nominal, kPa (lbf/pg²) (3 dígitos significativos);

F_n : Fuerza normal actuante sobre el espécimen, kN (lbf) (3 dígitos significativos).

Nota 15: A los valores calculados de esfuerzos normales o de corte, o a ambos, se les pueden aplicar factores que incorporen suposiciones en relación con el área real de la superficie del

espécimen sobre la que se miden las fuerzas normales y de corte. Si se hacen las correcciones, los factores y los criterios para utilizarlas se deben explicar con los resultados del ensayo.

- 9.3** *Velocidad de desplazamiento* – Se calcula la velocidad de desplazamiento a lo largo de la superficie de corte, con la expresión:

$$R_d = \frac{d_h}{t_e} \quad [154.6]$$

- Donde:
- R_d : Velocidad de desplazamiento, mm/min (pg./min) (3 dígitos significativos);
 - d_h : Desplazamiento lateral relativo, mm (pg.) (3 dígitos significativos);
 - t_e : Tiempo transcurrido durante el ensayo, min (3 dígitos significativos).

- 9.4** *Porcentaje de desplazamiento lateral relativo* – El porcentaje de desplazamiento lateral relativo a lo largo de la superficie de falla se calcula con la ecuación:

$$P_d = \frac{d_h}{D} \times 100 \quad [154.7]$$

- Donde:
- P_d : Porcentaje de desplazamiento lateral relativo, % (3 dígitos significativos);
 - D : Diámetro o lado del espécimen en la dirección de corte, mm (pg) (3 dígitos significativos).

- 9.5** Se calculan los valores iniciales de la relación de vacíos, el contenido de agua, la densidad seca y el grado de saturación, con base en la gravedad específica, la masa inicial y la masa final del espécimen y el volumen inicial de éste. El volumen del espécimen se determina a partir de su espesor y de las dimensiones de la caja de corte.

- 9.6** Se calculan la relación de vacíos de precorte, la densidad seca y el contenido de agua, a partir de los valores usados en el numeral 9.5, más la deformación normal.

10 INFORME

10.1 El informe debe incluir:

- 10.1.1 Identificación de la muestra, proyecto y localización.
- 10.1.2 Identificación y descripción del tipo de aparato utilizado en el ensayo.
- 10.1.3 Descripción de la apariencia del espécimen, con base en la Norma INV E-102, los límites de Atterberg (Normas INV E-125 e INV E-126) y los datos granulométricos (Norma INV E-123), si se obtuvieron (Ver numeral 6.2).
- 10.1.4 Descripción de la estructura del suelo; es decir, si el espécimen es inalterado, remoldeado, compactado o preparado de otra manera.
- 10.1.5 El espesor y el diámetro inicial (lado para las cajas de corte cuadradas) de la muestra.
- 10.1.6 Masa seca inicial y final.
- 10.1.7 Humedad inicial y de precorte.
- 10.1.8 Densidad húmeda inicial y de precorte (nota 16).
- 10.1.9 Densidad seca inicial y de precorte, y relación de vacíos (nota 16).
- 10.1.10 Grado de saturación inicial y de precorte (nota 16).
- 10.1.11 Tabla con el esfuerzo normal, el desplazamiento normal final y la duración de los incrementos de carga durante la consolidación.
- 10.1.12 Tabla con el esfuerzo normal nominal, el esfuerzo cortante nominal, el desplazamiento lateral relativo o el porcentaje de desplazamiento lateral relativo, el desplazamiento normal y la velocidad de deformación durante el corte.
- 10.1.13 Un gráfico de logaritmo de tiempo o de la raíz cuadrada del tiempo versus la deformación, para los incrementos de carga usados para determinar la rata de corte.

10.1.14 Un gráfico del esfuerzo cortante nominal versus el desplazamiento lateral relativo o el porcentaje de desplazamiento lateral relativo.

10.1.15 En el caso de materiales cohesivos, observaciones relativas a la superficie de falla.

10.1.16 No conformidades en relación con el procedimiento normalizado; por ejemplo, secuencias especiales de carga o exigencias específicas de humedecimiento.

Nota 16: En la mayoría de los casos, hay una significativa pérdida de suelo durante el corte y la forma de la muestra se altera de tal modo, que las relaciones de fase (densidad, humedad y grado de saturación) no se pueden calcular con precisión; razón por la cual estos valores no suelen ser de utilidad.

11 PRECISIÓN Y SESGO

11.1 *Precisión* – No se presentan datos sobre precisión, debido a la naturaleza tan variada de los materiales que se someten a este ensayo.

11.2 *Sesgo* – No hay un valor aceptado de referencia para este método; en consecuencia, no se puede determinar el sesgo.

12 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 3080/D3080M – 11