

# ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL SOBRE SUELOS COHESIVOS

## INV E – 153 – 13

### 1 OBJETO

---

**1.1** La presente norma se refiere a la ejecución de dos ensayos de compresión triaxial sobre muestras de suelos cohesivos: (1) prueba no consolidada no drenada, UU y (2) prueba consolidada no drenada, CU.

**1.2** *Ensayo triaxial no consolidado no drenado, UU:*

**1.2.1** Se describe el procedimiento para determinar la resistencia y el comportamiento esfuerzo-deformación de un espécimen cilíndrico, inalterado o remoldeado, de suelo cohesivo, sometido a una presión de confinamiento dentro de una cámara triaxial, y sin posibilidad de drenaje durante la prueba. El espécimen se falla bajo compresión, sin drenaje y a una velocidad constante de deformación unitaria axial (deformación unitaria controlada).

**1.2.2** Mediante este ensayo se determinan las propiedades de resistencia no drenada y las relaciones esfuerzo-deformación de los suelos. Los resultados se entregan en términos de esfuerzos totales aplicados al espécimen, es decir, en el cálculo de esfuerzos no se tiene en cuenta la presión de poros.

*Nota 1: La determinación de la resistencia a la compresión inconfinada de suelos cohesivos se describe en la norma INV E-152.*

**1.3** *Ensayo triaxial consolidado no drenado, CU:*

**1.3.1** Se describe el procedimiento para determinar la resistencia y la relación esfuerzo - deformación unitaria de un espécimen cilíndrico de un suelo cohesivo saturado, inalterado o reconstituido. Las probetas se consolidan isotrópicamente y después se fallan bajo compresión, sin drenaje, a una velocidad constante de deformación axial (deformación controlada).

**1.3.2** Este método proporciona los datos correspondientes a carga axial, deformación axial y presión del agua de poros a partir de los cuales se calculan los esfuerzos efectivos y totales y la compresión axial.

- 1.3.3** También, entrega datos útiles para determinar algunas propiedades de resistencia y deformación de suelos cohesivos, tales como las envolventes de resistencia de Mohr y el módulo de Young. Generalmente, se ensayan tres especímenes a diferentes niveles de consolidación efectiva para definir una envolvente de resistencia.
- 1.3.4** La determinación de las envolventes de resistencia y el desarrollo de correlaciones para la interpretación y evaluación de los resultados de los ensayos, están fuera del alcance de esta norma.
- 1.4** *Términos densidad y peso unitario* – Los términos densidad y peso unitario con frecuencia se usan indistintamente. La densidad es la masa por unidad de volumen, mientras que el peso unitario es la fuerza por unidad de volumen. En esta norma, la densidad solo se expresa en Sistema Internacional. Una vez se haya determinado la densidad, el peso unitario se puede calcular en Sistema Internacional o en unidades libra-pulgada, o en ambas.
- 1.5** Esta norma reemplaza la norma INV E-153-07.

## 2 TERMINOLOGÍA

---

### 2.1 Definiciones de términos específicos a esta norma:

- 2.1.1** *Falla* – Se refiere a la condición de máximo esfuerzo o al esfuerzo a una deformación unitaria definida para una muestra de ensayo. La falla se toma, con frecuencia, como la diferencia máxima alcanzada, en términos de esfuerzos principales (máximo esfuerzo desviador); o la diferencia de esfuerzos principales (esfuerzo desviador) al 15 % de la deformación unitaria axial, la que primero se presente durante el desarrollo de la prueba. Dependiendo del comportamiento del suelo y de las condiciones específicas de la obra, se pueden definir otros criterios para determinar la falla como, por ejemplo, la oblicuidad del esfuerzo máximo efectivo ( $\sigma'_1/\sigma'_3$ )<sub>max</sub>, o la diferencia de esfuerzos principales (esfuerzo desviador) a una deformación unitaria axial diferente de 15 %.
- 2.1.2** *Resistencia a la compresión no consolidada-no drenada* – El valor del esfuerzo desviador (diferencia de esfuerzos principales) en la falla.
- 2.1.3** *Contrapresión* – Una presión que se aplica sobre el agua que hay en los poros del espécimen, con el objeto de comprimir el aire depositado en

ellos y generar su solución en el agua de poros incrementando el porcentaje de saturación.

- 2.1.4** *Esfuerzo efectivo de consolidación* – La diferencia entre la presión de cámara y la presión de poros antes de fallar el espécimen.

### 3 IMPORTANCIA Y USO

---

#### 3.1 *Ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU):*

- 3.1.1** En este método, se determina la resistencia a la compresión de unsuelo en términos de esfuerzos totales, razón por la cual, la resistencia resultante depende de la presión de poros desarrollada durante la carga. En este tipo de ensayo no se permite el flujo de fluidos desde o hacia la muestra de suelo mientras se está aplicando la carga; en consecuencia, la presión de poros resultante, y por lo tanto la resistencia, son diferentes de las que se desarrollan cuando se permite el drenaje.
- 3.1.2** Si el suelo está saturado 100 %, no se presenta consolidación cuando se aplica la presión de confinamiento ni durante la etapa de corte, ya que no se permite el drenaje. De ahí que se puedan obtener resultados de resistencia similares cuando se ensayan varias probetas del mismo material y con aproximadamente la misma humedad y la misma relación de vacíos. En este caso, la envolvente de falla de Mohr es, generalmente, una línea recta horizontal sobre el rango completo de esfuerzos de confinamiento, siempre y cuando las muestras estén totalmente saturadas.
- 3.1.3** Si la muestra está parcialmente saturada, porque esa sea su condición natural o porque se trata de un espécimen compactado, donde el grado de saturación es menor que 100 %, se puede presentar consolidación cuando se aplica la presión de confinamiento durante el corte, aun cuando el drenaje no esté permitido. Lo anterior significa que si se ensayaran varias muestras parcialmente saturadas del mismo material a diferentes presiones de confinamiento, la resistencia al corte no drenada sería diferente; en consecuencia, la envolvente de falla de Mohr en pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas sobre suelos parcialmente saturados es, generalmente, una curva.

- 3.1.4** La resistencia no consolidada no drenada a partir del ensayo triaxial, es apropiada para situaciones en las cuales se asume que las cargas se aplican tan rápidamente que no hay suficiente tiempo para disipar la presión de poros inducida, ni para que se presente consolidación durante el período de carga (no hay drenaje).
- 3.1.5** Las resistencias a la compresión determinadas usando este procedimiento, no son aplicables para condiciones de campo que difieran significativamente de aquellas usadas durante las pruebas.

**3.2** *Ensayo triaxial tipo consolidado no drenado (CU):*

- 3.2.1** En un ensayo de compresión triaxial, la resistencia al corte de un suelo saturado depende de los esfuerzos aplicados, del tiempo de consolidación, de la velocidad de deformación y de la historia de esfuerzos experimentada por el suelo. En este ensayo, las características de corte se miden bajo condición no drenada; caso que se aplica a condiciones de campo donde los suelos que han sido consolidados totalmente bajo una serie de esfuerzos, se someten a un cambio de esfuerzos sin tiempo para que tome lugar una consolidación adicional (condición no drenada); y las condiciones de campo son similares a las que se emplean en este método de ensayo en el laboratorio.
- 3.2.2** La resistencia al corte determinada a partir de este ensayo, se puede expresar en términos de esfuerzos efectivos, usando la presión de agua de poros medida durante la prueba. Esta resistencia al corte es válida para condiciones de campo donde se puede presentar el drenaje total (condiciones drenadas) o para aquellas en que se pueden estimar las presiones de poros inducidas por la carga, y las condiciones de campo son similares a las que se representan en el laboratorio.
- 3.2.3** La resistencia al corte determinada a partir de este ensayo, expresada en términos de esfuerzo efectivo (condición drenada) o de esfuerzo total (condición no drenada), se usa frecuentemente en análisis de estabilidad de terraplenes, cálculos de presión de tierras y diseño de fundaciones.

## 4 EQUIPO

- 4.1** El equipo necesario para desarrollar satisfactoriamente los ensayos se presenta en los siguientes numerales. Ver Figuras 153 - 1 y 153 - 2.
- 4.2** *Sistema de carga axial* – El mecanismo de carga axial puede ser un gato de tornillo dirigido por un motor eléctrico a través de una transmisión de engranaje; un dispositivo hidráulico de carga, o cualquier otro dispositivo de compresión con suficiente capacidad y control para generar la tasa de deformación unitaria axial (por aplicación de carga) requerida en el numeral 7.2.4.2. La velocidad de avance del aparato de carga no se debe desviar en más de  $\pm 5\%$  (para ensayos UU) ni de  $\pm 1\%$  (para ensayos CU) respecto del valor elegido. La vibración debida a la operación del aparato de carga debe ser muy pequeña, para evitar cambios dimensionales en la muestra o, en ensayos CU, para no producir cambios en la presión del agua de poros cuando las válvulas de drenaje están cerradas.

*Nota 2: Para verificar que el mecanismo de carga axial no genera vibraciones nocivas, se puede colocar un vaso con agua sobre la plataforma de carga con el aparato operando a la velocidad a la cual se va a realizar el ensayo y comprobar que no aparezcan ondas visibles en el líquido.*

- 4.3** *Medidor de carga axial (ensayos UU y CU)* – Puede ser una celda electrónica de carga, una celda de carga hidráulica, un anillo de carga o cualquier otro aparato capaz de medir la carga axial con una aproximación del 1 % de la carga axial de falla. Cuando el medidor se encuentra dentro de la cámara de compresión triaxial, debe ser insensible a las fuerzas horizontales y a la magnitud de la presión de cámara.
- 4.4** *Cámara de compresión triaxial (ensayos UU y CU)* – Consta de una placa superior y una placa inferior separadas por un cilindro. El cilindro puede ser de cualquier material capaz de resistir las presiones aplicadas. Es recomendable que sea transparente o que cuente con ventanas para observar el comportamiento de la muestra. La placa superior tiene una válvula de ventilación o purga que permite la salida del aire de la cámara a medida que ésta se va llenando. La placa inferior debe tener una entrada a través de la cual se llena la cámara. Para efectuar los ensayos triaxiales consolidados no drenados se requiere, además, que posea otras entradas que lleguen al pedestal y al cabezal de la muestra y permitan su saturación y drenaje en el momento correspondiente. La cámara debe proporcionar una conexión al cabezal. La cámara del triaxial tendrá una presión de cámara de trabajo igual a la suma del esfuerzo efectivo de consolidación y la contrapresión en el momento del ensayo CU.

- 4.5 Pistón de carga axial (Ensayos UU y CU)** – El pistón que pasa a través de la parte superior de la cámara y su sello debe ser diseñado de manera que la variación en carga axial debida a la fricción no sea mayor que el 0.1 % de la carga de falla y que el pandeo lateral del pistón durante la carga sea despreciable.

*Nota 3: Se recomienda emplear dos balineras para guiar el pistón con el fin de disminuir la fricción y mantener el alineamiento.*

*Nota 4: Muchos laboratorios han empleado exitosamente pistones con un diámetro mínimo igual a 1/6 del diámetro de la muestra, para minimizar la flexión lateral o pandeo.*

**4.6 Dispositivos de aplicación y control de presión y vacío:**

- 4.6.1 Ensayo triaxial tipo no consolidado no drenado (UU)** – El dispositivo para controlar la presión de la cámara debe ser capaz de aplicar y controlar presiones dentro de  $\pm 2$  kPa ( $0.25$  lbf/ $pg^2$ ) para presiones inferiores a  $200$  kPa ( $28$  lbf/ $pg^2$ ) y de  $\pm 1\%$  para presiones superiores. El dispositivo puede ser un tanque conectado a la cámara triaxial y parcialmente lleno con fluido de cámara (generalmente agua), con su parte superior conectada a una fuente de gas comprimido; la presión del gas se controla mediante un regulador de presiones y se mide con un manómetro, un transductor electrónico de presión, o cualquier otro aparato que cumpla con las tolerancias exigidas. Sin embargo, se puede usar también un sistema hidráulico presurizado por una carga muerta que actúe sobre el pistón, o cualquier otro dispositivo de regulación y medición de presión que cumpla con las tolerancias mencionadas en este numeral.

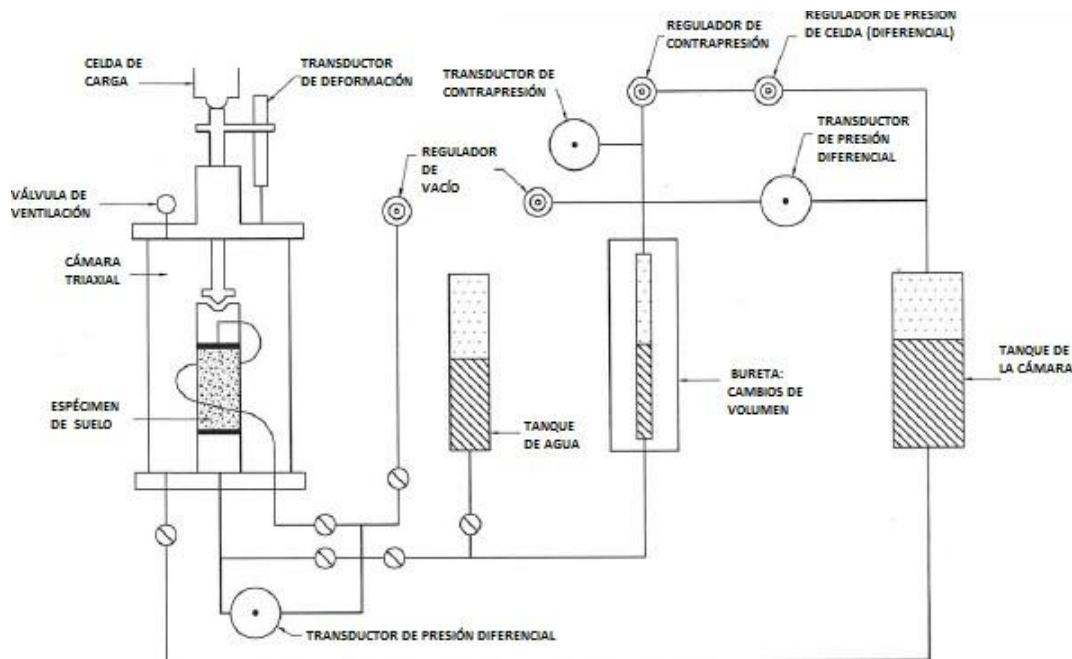


Figura 153 - 1. Diagrama esquemático de un aparato típico para ensayos triaxiales consolidados no drenados

**4.6.2 Ensaya triaxial tipo consolidado no drenado (CU)** – Los aparatos para controlar la presión y la contrapresión de la cámara deben ser capaces de aplicar y controlar presiones dentro de  $\pm 2$  kPa ( $0.25$  lbf/ $\text{in}^2$ ) para presiones efectivas de consolidación inferiores a  $200$  kPa ( $28$  lbf/ $\text{in}^2$ ) y de  $\pm 1\%$  para presiones superiores. El dispositivo para control de vacío deberá ser capaz de aplicar y controlar vacíos parciales dentro de  $\pm 2\%$ . Los aparatos consisten en reguladores neumáticos de presión para controlar la presión y el volumen, una combinación de reguladores de presión neumática y de vacío, u otro mecanismo que pueda aplicar y controlar presiones o vacíos parciales dentro de las tolerancias requeridas. Los ensayos triaxiales suelen durar varios días; por lo tanto, no es conveniente la presencia de una interfaz agua/aire en ninguno de los sistemas de presión, a menos que se encuentre aislada de la muestra y de la cámara (por ejemplo, por medio de una tubería larga).

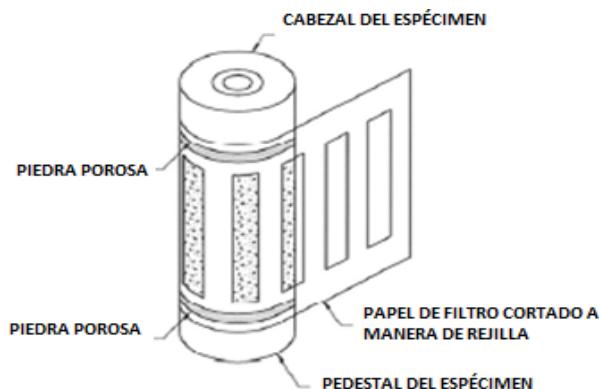


Figura 153 - 2. Colocación del papel de filtro

#### **4.7 Cabezal y pedestal del espécimen:**

**4.7.1 Ensayo consolidado no drenado (CU)** – Se diseñarán para proporcionar drenaje en ambos extremos de la muestra. Deben ser de un material rígido, no corrosivo e impermeable y cada uno debe tener, excepto para el suministro de drenaje, una superficie de contacto plana y circular con los discos porosos y una sección transversal circular. Es deseable que el cabezal y el disco poroso superior tengan una masa baja, como máximo el 10 % de la carga axial de falla. En caso de que la masa de estos dos elementos sea mayor que el 0.5 % de la carga axial de falla y mayor que 50 g, la carga axial aplicada se deberá corregir por tal motivo. Los diámetros del cabezal y del pedestal deberán ser iguales al diámetro inicial de la probeta de ensayo. El pedestal debe estar conectado a la cámara de compresión triaxial para prevenir movimiento lateral o ladeo y el cabezal debe estar diseñado de manera que la excentricidad del contacto pistón-cabezal, medida con respecto al eje vertical de la muestra, no exceda de 1.3 mm (0.05"). El área de contacto entre el pistón y el cabezal debe estar diseñada de manera que el ladeo de este último durante el ensayo sea mínimo. La superficie cilíndrica de la base y del cabezal que está en contacto con la membrana para formar un sello, debe ser lisa y estar libre de rayones.

**4.7.2 Ensayo no consolidado no drenado (UU)** – En este caso, el material también deberá ser rígido y no corrosivo, pero la tapa y la base deberán ser impermeables, para impedir el drenaje de la muestra. La masa del cabezal deberá producir un esfuerzo axial sobre el espécimen menor que 1 kN/m<sup>2</sup>. En lo demás, sus características son las mismas indicadas en el numeral 4.7.1.

**4.8 Indicador de deformación:**

- 4.8.1** *Ensayo triaxial tipo no consolidado no drenado (UU)* – La deformación vertical se debe medir con una aproximación de mínimo 0.03 % de la altura del espécimen. El rango del aparato debe ser de al menos el 20 % de la altura de la muestra, y puede ser de dial, un transformador diferencial de variación lineal (LVDT), un extensómetro o cualquier aparato que cumpla con los requisitos de exactitud y de rango.
- 4.8.2** *Ensayo triaxial tipo consolidado no drenado (CU)* – La deformación vertical del espécimen se determina a partir del recorrido del pistón que actúa sobre la parte superior de la muestra. Este recorrido se mide con una exactitud mínima de 0.25 % de la altura inicial de la probeta. El indicador de deformación debe tener un rango de al menos el 15 % de la altura inicial de la muestra y puede ser un indicador tipo dial u otro aparato que cumpla con los requerimientos descritos sobre exactitud y rango.
- 4.9** *Dispositivos de medición de presión y vacío* – La presión de cámara, – contrapresión–, y los aparatos de medida de vacío, deben ser capaces de medir presiones o vacíos parciales con las tolerancias citadas en los numerales 4.6.1 y 4.6.2. Pueden ser transductores de presión electrónicos u otros aparatos equivalentes. Cuando se emplean aparatos separados para medir la presión de cámara y la contrapresión, éstos deben ser calibrados simultáneamente y contra la misma fuente de presión. Adicionalmente, y puesto que la presión de cámara y la contrapresión se miden en la parte media del espécimen, puede ser necesario ajustar la calibración de los dispositivos para reflejar la cabeza hidráulica de los fluidos en los sistemas de control de la presión de cámara y de la contrapresión. Para el ensayo triaxial UU aplica solamente la parte de la presión de cámara.
- 4.10** *Dispositivo de medición de presión del agua de poros (Ensayo CU)* – La presión del agua de los poros de la muestra se debe medir de acuerdo con las tolerancias establecidas en el numeral 4.6.2. Durante el corte no drenado, al medir la presión de poros se debe procurar que la fuga o la entrada de agua sean nulas o despreciables. Para conseguir este objetivo, se debe usar un transductor electrónico de presión muy rígido o un indicador de nulos. Cuandose emplea el transductor, la presión se mide directamente. Con un indicador de nulos, un control de presión es ajustado continuamente para mantener un nivel constante de la interfaz agua/mercurio en el conducto capilar del dispositivo. La presión requerida para prevenir el movimiento del agua es igual

a la presión de poros. Ambos dispositivos deben tener una flexibilidad tal en relación con el volumen total, que se satisfaga el siguiente requisito.

$$(\Delta V / V) / \Delta u < 3.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{kN} (2.2 \times 10^{-5} \text{ pg}^2/\text{lbf}) \quad [153.1]$$

Donde:  $\Delta V$ : Cambio de volumen del sistema de medida de agua en los poros, debido a un cambio en la presión de poros,  $\text{mm}^3 (\text{pg}^3)$ ;

$V$ : Volumen total de la muestra,  $\text{mm}^3 (\text{pg}^3)$ ;

$\Delta u$ : Cambio en la presión de poros,  $\text{kPa} (\text{lbf}/\text{pg}^2)$ .

*Nota 5: Para cumplir con los requisitos de flexibilidad, la tubería entre la muestra y el dispositivo de medida debe ser corta y de pared gruesa, con pequeños orificios. Son adecuados los tubos termoplásticos, de cobre y acero inoxidable. Para medir esta flexibilidad, se arma la cámara triaxial sin la muestra. Luego, se abren las válvulas apropiadas, se incrementa la presión y se registra el cambio de volumen.*

**4.11 Dispositivo para medir el cambio de volumen (Ensayos CU)** – El volumen del agua que entra o sale de la muestra se debe medir con una aproximación de  $\pm 0.05\%$  del volumen total de la probeta de ensayo. Generalmente, se utiliza una bureta graduada conectada a la contrapresión pero puede ser cualquier dispositivo que cumpla con el requisito sobre exactitud. El dispositivo debe estar en capacidad de resistir la contrapresión máxima.

**4.12 Discos porosos (Ensayos CU)** – Se usan dos discos porosos rígidos para proporcionar drenaje en los extremos del espécimen. El coeficiente de permeabilidad de los discos puede ser aproximadamente igual al de la arena fina [ $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$  ( $4 \times 10^{-5} \text{ pg./s}$ )]. Los discos se deben limpiar regularmente por ultrasonido o por ebullición y cepillado, y chequeados para comprobar que no se encuentren colmatados.

**4.13 Discos y tiras o bandas de papel de filtro (Ensayos CU)** – Las tiras o bandas de papel de filtro se usan en muchos laboratorios para disminuir el tiempo requerido de prueba. Los discos de papel de filtro, de igual diámetro que el espécimen, se colocan entre los discos porosos y la probeta para evitar la colmatación de éstos. Si se usan bandas o discos, su material no deberá ser soluble en agua y su coeficiente de permeabilidad no será menor que  $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  ( $4 \times 10^{-6} \text{ pg./s}$ ) para una presión normal de  $550 \text{ kPa}$  ( $80 \text{ lbf}/\text{pg}^2$ ). Para evitar la tensión radial, la tira de papel de filtro deberá cubrir menos del 50 % de la periferia de la muestra. Algunos laboratorios emplean exitosamente jaulas de bandas de papel de filtro (Figura 153 - 2). La corrección del esfuerzo

desviador por efecto de la resistencia de las tiras o bandas verticales de filtro se hace mediante la ecuación dada en el numeral 9.3.3.3.1.

*Nota 6: El papel de filtro grado No. 54 cumple con los requisitos de permeabilidad y durabilidad.*

**4.14 Válvulas** – Los cambios de volumen producidos por la apertura y el cierre de válvulas pueden ocasionar medidas incorrectas de presión de poros y de cambio de volumen. Por ello, en el sistema de drenaje del espécimen (CU) se deben emplear válvulas que produzcan un mínimo cambio de volumen o de presión de poros durante su operación. Se asume que una válvula produce un cambio mínimo de volumen cuando al abrirla o cerrarla dentro de un sistema cerrado y saturado, no induce un cambio de presión mayor que 0.7 kPa ( $\pm 0.1 \text{ lbf}/\text{in}^2$ ). Todas las válvulas deben ser capaces de resistir las presiones aplicadas en el ensayo sin provocar fugas.

*Nota 7: Las válvulas de bola proporcionan características de mínimo cambio volumétrico. Sin embargo, se puede usar cualquier otro tipo de válvula, siempre que cumpla con la tolerancia especificada.*

**4.15 Desaireador de agua** – La cantidad de aire que está disuelto en el agua que se usa para saturar la muestra se debe disminuir usando procesos como ebullición, calentamiento o al vacío, u otros métodos que permitan saturar el suelo dentro de los límites impuestos por la máxima contrapresión disponible y por el tiempo para la ejecución del ensayo.

**4.16 Extractor de muestras (Ensayos UU y CU)** – Este aparato debe ser capaz de extraer la probeta de suelo del tubo de muestreo a una velocidad uniforme, en la misma dirección en que fue introducida la muestra dentro del tubo y con la mínima alteración posible. Si el espécimen no es extraído verticalmente, se deben evitar esfuerzos de flexión sobre la probeta debido a la gravedad.

**4.17 Elementos para medir el tamaño de la muestra (Ensayos UU y CU)** – Los aparatos para medir la altura y el diámetro del espécimen deben dar las dimensiones con cuatro dígitos significativos y no deben alterar o deformar la muestra cuando se usan. Las dimensiones se deberán medir dentro del 0.1 % de su longitud real.

*Nota 8: Es preferible emplear cintas métricas circunferenciales que calibradores para medir el diámetro.*

**4.18 Membrana de caucho (Ensayos UU y CU)** – La membrana de caucho usada para revestir el espécimen debe ser completamente impermeable. Las membranas se deben inspeccionar cuidadosamente antes de usarlas y se deben descartar cuando se evidencien orificios o defectos. Para generar una mínima restricción a la muestra, el diámetro de la membrana de caucho, sin estirar, deberá estar entre el 90 % y 95 % del diámetro del espécimen. El espesor de la membrana

no debe exceder el 1 % del diámetro del espécimen. La membrana se sellará al cabezal y a la base de la muestra con anillos de caucho en forma de O (aros tóricos) de diámetro interior (sin tensionarlos) entre el 75 % y 85 % del diámetro de las bases (cabezal y pedestal), o se emplearán otros medios que proporcionen una impermeabilidad perfecta. En el numeral 9.3.3.3.2 se presenta una ecuación para corregir el esfuerzo desviador a causa de la rigidez de la membrana.

- 4.19 Cronómetro (*Ensayos UU y CU*)** – Se emplea para determinar el tiempo transcurrido, con una aproximación de un segundo, con el fin de establecer la velocidad de la aplicación de la deformación o los datos de consolidación, según corresponda.
- 4.20 Balanza (*Ensayos UU y CU*)** – Con una posibilidad de lectura del 0.1 % de la masa de ensayo o mejor.
- 4.21 Ambiente del ensayo** – Las etapas de consolidación (*ensayo CU*) y de corte de ambos ensayos se deben desarrollar en un ambiente en el cual las fluctuaciones de temperatura sean menores de 4° C (7.2° F) y en un sitio donde no haya exposición directa a la luz del sol.
- 4.22 Equipo misceláneo (*Ensayos UU y CU*)** – Herramientas para el corte y tallado de muestras, que incluyen sierras de alambre, reglas de acero, caja de ingletes, torno vertical, aparatos para preparar muestras reconstituidas, dilatadores de membranas y arcos tóricos, recipientes para contenido de agua y formatos adecuados.

## 5 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

- 5.1 Tamaño de la probeta** – Los especímenes deben ser cilíndricos y tener un diámetro mínimo de 33 mm (1.3"). La relación altura promedio/diámetro promedio debe estar entre 2 y 2.5. El tamaño de la partícula más grande dentro de la muestra no debe ser menor que 1/6 del diámetro de la muestra de ensayo. Si después de la terminación del ensayo se encuentran sobretamaños, se deben hacer las anotaciones correspondientes en el informe.

*Nota 9: Cuando se encuentren sobretamaños después del ensayo, se debe realizar un análisis de tamaño de las partículas de acuerdo con la norma INV E-123, para confirmar la observación visual e incluir los respectivos resultados en el informe.*

- 5.2 Muestras inalteradas** – Se pueden preparar muestras inalteradas a partir de muestras inalteradas de mayor tamaño o de muestras obtenidas de acuerdo

con la norma INV E-105 o de otras muestras obtenidas mediante procedimientos aceptables para extraer muestras inalteradas de tubo. Las muestras se conservan y transportan de acuerdo con las recomendaciones para grupos C y D de la norma INV E-103. No es necesario tallar los especímenes que se obtienen por muestreo con tubo; solamente, se cortan los extremos, planos y perpendiculares al eje longitudinal de la probeta. La manipulación de las muestras debe ser cuidadosa para evitar alteración y cambios en la sección transversal o en la humedad. Cuando la extracción del tubo pueda alterar la muestra, se procederá a abrirlo longitudinalmente o a cortarlo en secciones que faciliten la remoción del suelo sin mayor alteración. La preparación de las probetas se hace en un cuarto de humedad controlada, para proteger la humedad natural del suelo. Cuando el labrado de la muestra produzca remoción de guijarros o desmoronamiento que generen vacíos en la superficie de la probeta, éstos se deberán llenar con suelo remoldeado obtenido de los recortes o residuos del tallado. Cuando la muestra lo permita, se puede tornear hasta alcanzar el diámetro requerido. Después, se coloca la muestra en una caja de ingletes y se corta el espécimen hasta la altura especificada con una sierra de alambre u otro aparato apropiado. Se arreglan las superficies con la regla de acero. Se efectúan uno o más ensayos de contenidos de humedad sobre el material de recorte, de acuerdo con la norma INV E-122.

- 5.3 Muestras reconstituidas por compactación** – El suelo empleado para formar las probetas se debe mezclar con agua suficiente hasta alcanzar el contenido de agua deseado. Posteriormente, el material humedecido se almacena en un recipiente con tapa durante 16 horas como mínimo, antes de la compactación. Las muestras reconstituidas se pueden preparar compactando el material en al menos 6 capas, usando un molde partido de sección transversal circular y que tenga las dimensiones descritas en el numeral 5.1. Para alcanzar la densidad requerida, se puede (1) amasar o apisonar cada capa hasta cuando la masa de suelo acumulada dentro del molde esté compactada a un volumen conocido; (2) ajustar el número de capas, el número de golpes por capa y la fuerza por golpe. La superficie de cada capa se debe escarificar antes de la adición del material correspondiente a la siguiente. El pisón empleado para compactar el suelo debe tener un diámetro igual o menor que la mitad del diámetro del molde.
- 5.4** Despues de que se conforma la probeta con extremos perpendiculares al eje longitudinal de la misma, se retira el molde y se determinan la masa y las dimensiones del espécimen usando los elementos descritos en los numerales 4.17 y 4.20. Se deben medir al menos tres alturas (espaciadas 120°) y al menos tres diámetros (a cada cuarto de altura) para determinar el promedio

respectivo. Ninguna medida de altura o de diámetro puede variar en más del 5 % del promedio. Se efectúan uno o más ensayos de humedad sobre el material de recorte, de acuerdo con la norma INV E-122.

*Nota 10: Es normal que al remover la probeta del molde su densidad o su peso unitario sea menor que el valor calculado con base en el volumen del molde, pues la muestra tiende a expandirse una vez se ha retirado el confinamiento lateral que genera éste.*

## 6 MONTAJE DE LA MUESTRA

---

### 6.1 *Ensayo triaxial tipo no consolidado no drenado, UU:*

- 6.1.1** Se inspecciona la membrana de caucho para descartar imperfecciones, agujeros y fugas. Se coloca la membrana en el dilatador, o sobre el cabezal o la base si se va a enrollar sobre la muestra. Se ubica la probeta sobre el pedestal. Se coloca la membrana de caucho alrededor del espécimen y se sella al cabezal y a la base usando aros tóricos u otros dispositivos de sellado en cada extremo. Se puede emplear una capa delgada de grasa de silicona sobre las superficies verticales del cabezal o de la base para conseguir un sellamiento efectivo.
- 6.1.2** Con la muestra ubicada en la cámara, se arma la cámara triaxial. Se pone el pistón de carga axial varias veces en contacto con el cabezal de la muestra, para conseguir el ajuste y el alineamiento apropiados de los dos dispositivos. Cuando el pistón se haya acomodado apropiadamente y haga contacto la última vez, se registra la lectura del deformímetro con tres cifras significativas. Durante este proceso, no se debe aplicar una carga axial superior a 0.5 % de la resistencia a la compresión estimada. Si el solo peso del pistón es suficiente para alcanzar este límite, se debe asegurar el pistón varias veces sobre el cabezal del espécimen después de haber verificado el ajuste y el alineamiento y mantenerlo en esta posición hasta la aplicación de la presión de cámara.

### 6.2 *Ensayo triaxial tipo consolidado no drenado, CU:*

#### 6.2.1 *Preparaciones:*

- 6.2.1.1** Se inspecciona la membrana de caucho para descartar imperfecciones, agujeros y fugas. Se coloca la membrana en el dilatador, o sobre el cabezal o la base si se va a enrollar sobre la muestra.

- 6.2.1.2** Se verifica que los discos porosos y los tubos de drenaje de la probeta no estén obstruidos, pasando aire o agua a través de ellos.
- 6.2.1.3** Se sujetan los sistemas de control de presión y medición de volumen y el aparato para medir la presión de poros a la base de la cámara.
- 6.2.2** Dependiendo de si la etapa de saturación del ensayo se va a iniciar con un sistema de drenaje húmedo o seco, se monta la muestra usando el método apropiado, de acuerdo con las instrucciones presentadas en los numerales 6.2.2.1 o 6.2.2.2. El método de montaje en seco se recomienda ampliamente para especímenes con saturación inicial menor que 90 %. Este montaje remueve el aire antes de adicionar la contrapresión y reduce la contrapresión necesaria para alcanzar el porcentaje adecuado de saturación.

*Nota 11: Se recomienda usar el montaje en seco para suelos con apreciable potencial de expansión en contacto con el agua, pues cuando se usa el montaje húmedo, es necesario obtener las dimensiones de la muestra después de que ésta ya ha sido montada. En tales casos, se deberá determinar el espesor doble de la membrana, el espesor doble de las tiras o bandas de papel de filtro húmedo (en caso de que se use) y la altura combinada del cabezal, el pedestal y los discos porosos (incluyendo el espesor de los discos de papel de filtro si se han usado) para encontrar los valores apropiados por sustracción.*

**6.2.2.1** *Método de montaje húmedo:*

- 6.2.2.1.1** Se llenan con agua desaireada las líneas de drenaje del espécimen y el aparato de medición de presión de poros.
- 6.2.2.1.2** Se saturan los discos porosos por ebullición en agua durante un período mínimo de 10 minutos y se permite que se enfríen a temperatura ambiente.
- 6.2.2.1.3** Si se emplean discos papel filtro entre las piedras porosas y la muestra, se satura el papel con agua antes de su colocación.
- 6.2.2.1.4** Se coloca un disco poroso sobre el pedestal de la muestra y se retira toda el agua libre del disco. Se ubica el disco de papel filtro sobre el disco poroso, en caso de ser usado. Se monta la

probeta sobre el disco. Se coloca encima otro disco de papel de filtro, el disco poroso y el cabezal sobre la parte superior del espécimen. Se verifica que el conjunto haya quedado centrado sobre el pedestal.

- 6.2.2.1.5** Cuando se usan bandas de papel filtro o una rejilla de papel filtro, se debe saturar el papel con agua antes de su colocación. Para evitar la tensión circunferencial, no se debe cubrir más del 50 % de la periferia de la probeta con tiras verticales.

- 6.2.2.1.6** Se procede con el paso 6.2.3.

**6.2.2.2** *Método de montaje en seco:*

- 6.2.2.2.1** Se seca el sistema de drenaje del espécimen. Se puede hacer permitiendo que el aire seco fluya en el sistema antes del montaje de la muestra.

- 6.2.2.2.2** Se secan los discos porosos en un horno y luego se colocan en un desecador para enfriarlos a temperatura ambiente antes del montaje del espécimen.

- 6.2.2.2.3** Se coloca un disco poroso seco en la base y se ubica la probeta sobre él. En seguida, se dispone sobre ésta el otro disco poroso y el cabezal. Se verifica que el conjunto haya quedado centrado en el pedestal.

*Nota 12: Si se desea, se pueden emplear discos de papel filtro entre los discos porosos y la muestra.*

- 6.2.2.2.4** Si se usan tiras o rejillas de bandas de papel de filtro, se deben mantener en su lugar con pequeños pedazos de cinta en los extremos superior e inferior.

- 6.2.3** Se coloca la membrana de caucho alrededor de la muestra y se sella contra el cabezal y el pedestal con dos anillos tóricos u otro medio de sellado en cada extremo. Un delgado recubrimiento con grasa de

silicona sobre las superficies verticales del cabezote y de la base ayudará a sellar la membrana. Si se usan bandas o tiras de papel de filtro cortadas en forma de rejilla, no se debe aplicar grasa a las superficies en contacto con el papel.

- 6.2.4** Se instala la línea de drenaje superior y se verifica el alineamiento del espécimen y del cabezal. Si el montaje ha sido en seco, se aplica un vacío parcial de, aproximadamente, 35 kPa (5 lbf/pg<sup>2</sup>) (que no exceda el esfuerzo de consolidación) a la probeta a través de la línea superior de drenaje antes de comprobar el alineamiento. Si se detecta alguna excentricidad, se relaja el vacío parcial, se realinean la muestra y el cabezal y se vuelve a aplicar el vacío parcial. Si el montaje ha sido en húmedo, el alineamiento del espécimen y su cabezal se pueden verificar y ajustar sin necesidad de un vacío parcial.

## 7 PROCEDIMIENTO

---

### 7.1 Ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU):

- 7.1.1** Se coloca la cámara en su posición en el sistema de carga axial. Los dos se deben alinear con el dispositivo de medición de carga axial, para prevenir la aplicación de una fuerza lateral sobre el pistón durante el ensayo. Se conecta el aparato de medición y regulación de la presión y se llena la cámara con el fluido de confinamiento. Se ajusta el dispositivo que aplica presión a la presión de cámara deseada y se aplica la presión al fluido. Se esperan unos 10 minutos para permitir que el espécimen se estabilice bajo la presión de cámara, antes de la aplicación de la carga axial.

*Nota 13: En algunos casos, se llena la cámara y se aplica la presión de cámara antes de su instalación en el sistema de carga axial.*

*Nota 14: Se debe comprobar que el pistón esté asegurado o bloqueado en su lugar por el sistema de carga axial, antes de aplicar la presión de cámara.*

*Nota 15: En suelos blandos o parcialmente saturados, es probable que haya que incrementar el tiempo de espera.*

- 7.1.2** Si el aparato de medida de carga axial está ubicado por fuera de la cámara triaxial, la presión de cámara provocará una fuerza vertical ascendente sobre el pistón que reaccionará contra el sistema de carga axial. En este caso, se debe comenzar el ensayo con el pistón ubicado por encima del cabezal, y antes de que el pistón entre en contacto con

aquel, se debe seguir uno de dos procesos: (1) medir y registrar la fricción inicial del pistón con tres dígitos significativos y el empuje del pistón hacia arriba, producido por la presión de cámara y luego corregir la carga axial medida; o (2) ajustar el aparato de medida de carga axial para compensar la fricción del pistón y el empuje. Si el aparato se ubica dentro de la cámara, no es necesario realizar estas correcciones. En ambos casos, se debe registrar la lectura inicial del indicador de deformación en el momento en que el pistón hace contacto con el cabezal.

- 7.1.3** Se aplica la carga axial para producir una tasa de deformación unitaria axial de, aproximadamente, 1 %/minuto para materiales plásticos y 0.3 %/minuto para materiales frágiles que alcancen el máximo esfuerzo desviador a una deformación axial unitaria entre 3 % y 6 %. A estas velocidades, el tiempo transcurrido para alcanzar el máximo esfuerzo desviador estará entre 15 y 20 minutos. Se continúa la carga hasta conseguir el primero de los siguientes eventos: (1) se alcanza el 15 % de deformación axial unitaria; (2) el esfuerzo desviador (diferencia de esfuerzos principales) cae 20 % después del pico, o (3) se llega a una deformación unitaria axial 5 % mayor que aquella a la cual se ha presentado el pico en el esfuerzo desviador.
- 7.1.4** Los valores de carga y de deformación se registran con tres dígitos significativos, a lecturas de deformación unitaria de alrededor de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 %; luego, a incrementos de alrededor de 0.5 % de deformación unitaria hasta 3 % y, por último, cada 1 %. Se deben tomar suficientes lecturas para definir la curva esfuerzo-deformación unitaria; es recomendable incrementar la frecuencia de lectura en las etapas iniciales y cuando el momento de la falla esté cerca.

*Nota 16: Se pueden usar intervalos alternos para efectuar las lecturas, siempre que se obtengan suficientes puntos para permitir la definición de la curva esfuerzo-deformación unitaria.*

## 7.2 *Ensayo consolidado no drenado (CU):*

- 7.2.1** *Antes de la saturación* – Después del montaje de la cámara triaxial, se debe continuar con el siguiente procedimiento:
- 7.2.1.1** Se pone en contacto varias veces el pistón de carga axial con el cabezal del espécimen, para permitir un asentamiento adecuado y el alineamiento de los dos elementos. Durante este proceso, no se debe aplicar una carga axial superior a 0.5

% de la carga estimada de falla. Cuando el pistón entre en contacto, se registra la lectura del deformímetro con tres dígitos significativos.

**7.2.1.2** Se llena la cámara con el líquido de cámara, evitando que quede aire dentro de la misma.

**7.2.2** *Saturación* – El objetivo de la fase de saturación del ensayo es llenar todos los vacíos de la muestra con agua, sin pre-esforzar la muestra o permitir su expansión. La saturación se consigue aplicando contrapresión al agua del espécimen con el objeto de conducir el aire en solución luego de la saturación del sistema, ya sea: (1) aplicando vacío al espécimen y al sistema de drenaje en seco (líneas, discos porosos, aparato de presión de poros, bandas o jaulas y discos de papel filtro) y luego, permitiendo que el agua desaireada fluya a través del sistema y de la muestra mientras se mantiene el vacío; o (2) saturando el sistema de drenaje por ebullición de los discos porosos en agua y permitiendo el flujo del agua a través del sistema antes del montaje del espécimen. Se debe notar que la dilución del aire en el agua es función del tiempo y de la presión. Por consiguiente, la remoción de tanto aire como sea posible antes de la aplicación de la contrapresión, disminuye la cantidad de aire que será puesto en solución y, también, disminuye la contrapresión requerida para la saturación. Adicionalmente, el aire que queda en el espécimen y en el sistema de drenaje justo antes de la aplicación de la contrapresión, entrará en solución más rápidamente si se usa agua desaireada para la saturación. El uso de agua desaireada también disminuye el tiempo y la contrapresión requeridos para la saturación. Existen muchos procedimientos para llevar a cabo la saturación. Dentro de éstos se sugieren los siguientes:

**7.2.2.1** *Con el sistema de drenaje inicialmente seco* – Se incrementa el vacío parcial que actúa sobre la parte superior de la probeta hasta el máximo vacío disponible. Si el esfuerzo efectivo de consolidación bajo el cual se quiere determinar la resistencia es menor que el vacío máximo parcial, se aplica un vacío parcial más bajo a la cámara. La diferencia entre el vacío parcial aplicado a la muestra y el vacío parcial de la cámara nunca debe exceder el esfuerzo efectivo de consolidación para el ensayo y no debe ser menor de 35 kPa (5 lbf/in<sup>2</sup>) para permitir el flujo a través de la muestra. Después de unos 10 minutos, se permite que el agua desaireada percole desde el

fondo hasta la parte superior del espécimen bajo un vacío diferencial de menos de 20 kPa (3 lbf/pg<sup>2</sup>) (nota 17).

**7.2.2.1.1** Se debe mantener siempre un esfuerzo efectivo positivo de, al menos, 13 kPa (2 lbf/pg<sup>2</sup>) en la parte inferior de la muestra durante esta parte del proceso. Cuando el agua aparece en la bureta conectada a la parte superior del espécimen, se cierra la válvula de la parte inferior del mismo y se llena la bureta con agua desaireada. Después, se reduce a presión atmosférica el vacío que actúa en la parte superior de la muestra a través de la bureta, mientras que, simultáneamente, se incrementa en una cantidad igual la presión de la cámara. Este procedimiento se efectúa lentamente, de manera que las presiones de poros medidas en la parte inferior y en la parte superior de la muestra se igualen. Cuando la presión de poros de la base de la muestra se estabilice, se aplica la contrapresión como se describe en 7.2.2.3.1. Para verificar la igualdad de presiones, se cierran las válvulas de drenaje y se mide el cambio de presión de poros hasta cuando se vuelve estable. Si el cambio es menor que el 5 % de la presión de cámara, se asume entonces que la presión de poros se ha estabilizado.

*Nota 17: En arcillas saturadas no es necesaria la percolación y el agua se puede adicionar simultáneamente en las partes superior e inferior.*

**7.2.2.2** *Con el sistema de drenaje inicialmente saturado* – Despues de llenar la bureta conectada a la parte superior del espécimen con agua desaireada, se aplica una presión de cámara de 35 kPa (5 lbf/pg<sup>2</sup>) o menor y se abren las válvulas de drenaje de la muestra. Cuando la presión de poros en la parte inferior del espécimen se estabiliza, de acuerdo con el procedimiento descrito en el numeral 7.2.2.1, o cuando la lectura de la bureta se estabiliza, se comienza a aplicar la contrapresión.

**7.2.2.3** *Saturación por contrapresión* – Generalmente, es necesario aplicar contrapresión para saturar la muestra. La Figura 153 -

3 proporciona una guía de la contrapresión requerida para alcanzar la saturación.

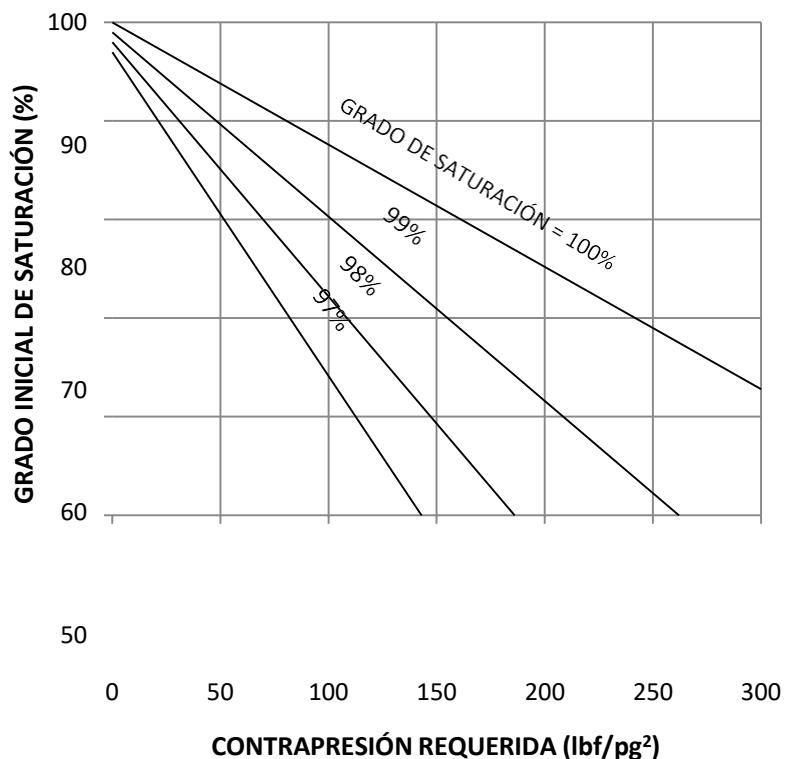


Figura 153 - 3. Presión para alcanzar varios grados de saturación

**7.2.2.3.1** *Aplicación de la contrapresión* – Con las válvulas de drenaje abiertas, se incrementan simultáneamente la contrapresión y la presión de cámara por etapas, de tal manera que el agua desaireada de la bureta conectada a la base y a la parte superior del espécimen pueda fluir dentro del mismo. Para evitar un pre- esfuerzo indeseable de la muestra mientras se aplica la contrapresión, las presiones se deben aplicar en incrementos, con un tiempo adecuado entre ellos para permitir la homogenización de la presión de poros a través de la muestra. Cada incremento puede estar entre 35 kPa (5 lbf/pg<sup>2</sup>) y 140 kPa (20 lbf/pg<sup>2</sup>), dependiendo de la magnitud del esfuerzo deseado de pre-consolidación efectiva, y del grado de saturación de la muestra justo antes de la aplicación del incremento. La diferencia entre la presión de cámara y la contrapresión durante la aplicación de esta última, no debe ser mayor que 35 kPa

(5 lbf/in<sup>2</sup>), a menos que

se considere necesario para controlar la expansión del suelo durante el procedimiento. La diferencia entre la presión de cámara y la contrapresión, debe permanecer dentro de  $\pm 5\%$  cuando se está incrementando la presión y dentro de  $\pm 2\%$  cuando la presión es constante. Para comprobar el equilibrio después de la aplicación de un incremento de contrapresión o después de que el valor total de la contrapresión ha sido aplicado, se cierran las válvulas de drenaje y se mide el cambio en la presión de poros durante un intervalo de 1 minuto. Si este cambio es menor que el 5 % de la diferencia entre la presión de cámara y la contrapresión, se requerirá de otro incremento de contrapresión o habrá que medir el parámetro B de la presión de poros (ver numeral 7.2.2.4), para verificar si la saturación es total. Si el parámetro B es mayor o igual que 0.95, o si B permanece constante bajo la aplicación de incrementos de contrapresión, se considera que la muestra está saturada.

*Nota 18: Las relaciones mostradas en la Figura 153 - 3 se basan en la premisa de que el agua usada para la contrapresión es desaireada y que la única fuente de aire que hay para disolver en el agua es el aire de la muestra de ensayo. Cuando se usa presión de aire para controlar la contrapresión, este aire presurizado se disolverá en el agua, reduciendo así la capacidad del agua usada en la contrapresión para disolver el aire de los poros del espécimen. El problema se minimiza usando un tubo largo ( $> 5\text{ m}$ ) impermeable al aire entre la interfaz aire-agua y la muestra; separando el agua de la contrapresión del aire presurizado empleando un material o fluido relativamente impermeable al aire; reemplazando periódicamente el agua de contrapresión por agua desaireada, o por otros medios.*

*Nota 19: Aunque el parámetro B de presión de poros se usa para determinar el grado de saturación, el valor B también es función de la rigidez del suelo. Si la saturación de la muestra es de 100 %, el valor de B será mayor cuanto menos rígido sea el suelo. De allí que en suelos blandos, un valor de 95 % para B pueda indicar una saturación menor de 100 %.*

*Nota 20: La contrapresión requerida para saturar un espécimen reconstituido puede ser mayor por el método húmedo que por el método de montaje en seco. Su valor puede ser tan grande como 1400 kPa (200 lbf/in<sup>2</sup>).*

*Nota 21: En muchos laboratorios se usan reguladores y transductores de presión diferencial para cumplir los requerimientos de pequeñas diferencias entre la presión de la cámara y la contrapresión.*

**7.2.2.4 Medida del parámetro B de la presión de poros** – Para su determinación se siguen los pasos del 7.2.2.4.1 al 7.2.2.4.4. El parámetro B se define como:

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_3$$

[153.2]

Donde:  $\Delta u$ : Cambio en la presión de poros de la muestra, ocurrido como resultado del cambio en la presión de cámara cuando las válvulas de drenaje de la probeta están cerradas;

$\Delta \sigma_3$ : Cambio en la presión de cámara.

**7.2.2.4.1** Se cierran las válvulas de drenaje de la muestra, se registra la presión de poros con una aproximación de 0.7 kPa (0.1 lbf/pg<sup>2</sup>), y se incrementa la presión de cámara en 70 kPa (10 lbf/pg<sup>2</sup>).

**7.2.2.4.2** Despues de 2 minutos, aproximadamente, se determina y se anota el máximo valor depresión de poros inducido con unaaproximación de 0.7 kPa (0.1 lbf/pg<sup>2</sup>). En muchas muestras, se puede presentar una disminución de presión de poros inmediata perodespués crece levemente con el tiempo. Si esto ocurre, los valores de  $\Delta u$  se deben dibujar contra el tiempo, usando luego la presión deporos asintótica como el cambio en la presión de poros. Un incremento grande de  $\Delta u$  con el tiempo, o valores de  $\Delta u$  mucho mayores que  $\Delta \sigma_3$ , indican una filtración del fluido de cámara hacia la muestra. Cuando los valores de  $\Delta u$  disminuyen con el tiempo, puede ser indicio de una fuga en la parte del sistema de medición de

presión de poros ubicada fuera de la cámara de compresión.

**7.2.2.4.3** Se calcula el valor B usando la ecuación mostrada en el numeral 7.2.2.4.

**7.2.2.4.4** Se vuelve a aplicar el mismo esfuerzo de consolidación que existía antes del proceso para encontrar el valor B; para esto, se reduce la presión de cámara en 70 kPa (10 lbf/pg<sup>2</sup>) o, alternativamente, se incrementa el valor de la contrapresión en 70 kPa (10 lbf/pg<sup>2</sup>). Si B continúa aumentando con el incremento de contrapresión, se continúa la saturación por contrapresión. Si B es igual o mayor que 0.95 o si la gráfica de B versus contrapresión indica que no hay un incremento adicional de B al aumentar la contrapresión, entonces se debe comenzar la consolidación.

**7.2.3** *Consolidación* – El objetivo de la fase de consolidación del ensayo es permitir que la muestra alcance el equilibrio en un estado drenado, a un esfuerzo de consolidación efectivo para el cual se desea encontrarla resistencia. Durante la consolidación, se obtienen datos para determinar cuándo se completa este proceso y para calcular la rata de deformación unitaria a emplear durante la etapa de corte del ensayo. A continuación se describe el procedimiento de consolidación:

**7.2.3.1** Cuando se ha terminado la fase de saturación, se coloca el pistón en contacto con el cabezal de la muestra y se registra la lectura del indicador de deformación con tres cifras significativas. Durante este proceso, se debe evitar la aplicación de una carga axial que exceda 0.5 % de la carga axial de falla estimada. Después de registrada la lectura, se eleva y se asegura el pistón.

**7.2.3.2** Con las válvulas de drenaje cerradas, se mantiene constante la máxima contrapresión y se incrementa la presión de cámara hasta que la diferencia entre la presión de cámara y la contrapresión sea igual que la presión efectiva de consolidación deseada. La consolidación en etapas es necesaria cuando el esfuerzo final efectivo de consolidación

es mayor que 40 kPa (5.8 lbf/pg<sup>2</sup>) y se usan bandas de filtro para el drenaje radial. La relación de incremento de carga, no debe ser mayor que 2.

- 7.2.3.3** Se obtiene una lectura inicial del aparato para medir cambios de volumen y, luego, se abren las válvulas de drenaje apropiadas de manera que el espécimen pueda drenar por ambos extremos hacia el dispositivo de cambio de volumen. Para cada intervalo de tiempo fijado (0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, y 30 min y 1, 2, 4, y 8 h, y así sucesivamente) se observan y registran la lecturas de cambio de volumen y, después de la lectura de los 15 min, se registran las lecturas del indicador de deformación, obtenidas colocando cuidadosamente el pistón sobre el cabezal de la muestra. Si se van a graficar las lecturas de cambio de volumen y del indicador de deformación contra la raíz cuadrada del tiempo, los intervalos de tiempo a los cuales se deben tomar las lecturas se pueden ajustar a aquellos que tengan raíces cuadradas exactas, por ejemplo, 0.09, 0.25, 0.49, 1, 4 y 9 min, y así sucesivamente. Dependiendo del tipo de suelo, los intervalos de lectura se pueden cambiar por otros que permitan una definición adecuada del cambio de volumen con el tiempo.

*Nota 22: En los casos en los cuales se laven cantidades significativas de finos del espécimen debido a altos gradientes hidráulicos iniciales, se permite incrementar gradualmente la presión de cámara hasta alcanzar la presión total requerida teniendo las válvulas de drenaje abiertas. El registro de los datos debe comenzar inmediatamente después de que se alcance la presión total.*

- 7.2.3.4** Se grafican los cambios de volumen y las lecturas del indicador de deformación contra el logaritmo del tiempo o contra la raíz cuadrada del tiempo. Se permite que la consolidación continúe por, al menos, un ciclo logarítmico de registro del tiempo o por una noche después de que se ha alcanzado el 100 % de la consolidación primaria, instante determinado de acuerdo con la norma INV E-151. Una desviación marcada entre las pendientes de las curvas de cambio de volumen y del indicador de deformación hacia el final de la consolidación, basadas en las lecturas del indicador de deformación, es señal de filtración del fluido de la cámara hacia el espécimen, y el ensayo se debe dar por terminado.

- 7.2.3.5** Se determina el tiempo para el 50 % de la consolidación primaria, siguiendo la norma INV E-151. Si la muestra se expande o no se consolida al final del esfuerzo efectivo de consolidación, se debe encontrar la razón para este comportamiento y se verifica si el equipo no está funcionando mal. Se puede tomar el dato de  $t_{50}$  de ensayos realizados sobre muestras similares, en los cuales se hayan empleado mayores esfuerzos finales de consolidación efectiva. Si no hay datos disponibles, se usará una velocidad de deformación unitaria de 1%/hora.
- 7.2.4** *Corte o falla de la muestra* – Durante el corte, la presión de cámara se debe mantener constante mientras que el pistón de carga axial avanza hacia abajo contra el cabezal del espécimen, usando una deformación unitaria axial controlada de acuerdo con el criterio de carga. No se permite el drenaje de la muestra durante la etapa de corte.
- 7.2.4.1** *Antes de la carga axial* – Antes de iniciar el corte, se ejecutan las siguientes acciones:
- 7.2.4.1.1** Abriendo o cerrando las válvulas apropiadas se aísla el espécimen de manera que durante el corte se puedan tomar lecturas de presión de poros y no se presente drenaje.
- 7.2.4.1.2** Se coloca la cámara en posición en el dispositivo de carga axial. Se deben alinear el dispositivo de carga axial, el aparato de medida de carga y la cámara triaxial, para evitar la aplicación de una fuerza lateral al pistón durante el corte.
- 7.2.4.1.3** Se pone en contacto el pistón de carga con el cabezal de la muestra para permitir un adecuado asentamiento y alineación. Durante este proceso, se debe tener cuidado de no aplicar una carga mayor que 0.5 % de la carga de falla estimada. Si el aparato para medir la carga axial está localizado por fuera de la cámara triaxial, la presión de cámara producirá una fuerza hacia arriba sobre el pistón, el cual reaccionará contra el aparato de carga axial. Para tomar esto en cuenta, se comienza el corte

con el pistón ubicado levemente encima del cabezal, y antes de que el pistón entre en contacto con aquel: (1) se mide y registra la fricción inicial del pistón y el empuje del pistón hacia arriba, producido por la presión de cámara y después se corrige la carga axial medida, o (2) se ajusta el aparato de medición de carga axial para compensar la fricción y el empuje. La variación en la lectura del aparato de medición de carga axial no debe ser mayor que 0.1 % de la carga estimada de falla cuando el pistón se mueva hacia abajo antes de entrar en contacto con el cabezal. Cuando el dispositivo para medir la carga axial está dentro de la cámara, no son necesarias estas correcciones. Sin embargo, si se usa un aparato interno muy flexible para la medida de la carga en combinación con un medidor de deformación externo, será necesario corregir las lecturas de deformación. En ambos casos, se debe registrar la lectura inicial del aparato de medida de presión de poros, con una aproximación de 0.7 kPa (0.1 lbf/pg<sup>2</sup>), inmediatamente antes de que el pistón entre en contacto con el cabezal, y se toma la lectura del medidor de deformación, con tres dígitos significativos, cuando el pistón contacte el cabezal.

#### 7.2.4.1.4

Se verifica la estabilización de la presión de poros. Se registra la presión de poros con una aproximación de 0.7 kPa (0.1 lbf/pg<sup>2</sup>). Se cierran las válvulas de drenaje del espécimen y se mide el cambio de presión de poros hasta cuando se estabilice. Si este cambio es menor que el 5 % de la presión de cámara, se puede asumir que la presión de poros es estable.

#### 7.2.4.2 *Carga axial* – Se aplica la carga axial a la muestra usando una velocidad de deformación unitaria axial tal, que produzca una presión de poros aproximadamente igual a través de todo el espécimen en la falla. Si se asume que la falla ocurre después

de 4 % de deformación, se puede determinar una velocidad de deformación unitaria adecuada,  $\dot{\epsilon}$ , a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{\epsilon} = \frac{4\%}{10 t_{50}} \quad [153.3]$$

Donde:  $t_{50}$ : Valor de tiempo obtenido en el numeral 7.2.3.5.

Si se espera que la falla ocurra a un valor de deformación menor que 4 %, la velocidad adecuada de deformación se determina usando esta ecuación, pero reemplazando el 4 % por la deformación unitaria estimada en la falla. Esta velocidad de deformación sirve para determinar las trayectorias precisas del esfuerzo efectivo en el rango necesario para definir las envolventes de resistencia efectiva.

**7.2.4.2.1** Como mínimo, la carga y la deformación se deben registrar con tres dígitos significativos, y los valores de presión de poros con una aproximación de 0.7 kPa (0.1 lbf/pg<sup>2</sup>) para incrementos de 0.1 a 1 % de deformación unitaria y, a partir de éstos, cada 1 %. Se deben tomar suficientes lecturas para definir la curva esfuerzo-deformación unitaria; es probable que se requieran lecturas más frecuentes en las etapas tempranas del ensayo y a medida que se aproxima la falla. Se continúa la carga hasta el 15 % de deformación unitaria, excepto cuando se presente una caída del 20 % en el esfuerzo desviador (diferencia de esfuerzos principales), o cuando se complete una deformación adicional del 5 % después de un pico en el esfuerzo desviador.

*Nota 23: El uso de un detector de nulos de ajuste manual requerirá mayor atención y seguimiento constante para asegurar el criterio de corte no drenado.*

## 8 REMOCIÓN DE LA MUESTRA

**8.1** Una vez terminada la etapa de corte, se realizan los siguientes pasos:

- 8.1.1** Se remueve la carga axial y se reducen las presiones de cámara y de contrapresión a cero.
- 8.1.2** Con las válvulas de drenaje de la muestra cerradas, se retira rápidamente el espécimen, de tal manera que no haya tiempo para que absorba agua de los discos porosos.
- 8.1.3** Se retira la membrana de caucho (y las bandas o tiras en forma de rejilla de papel de filtro del espécimen) y se determina el contenido de agua de la muestra total de acuerdo con la norma INV E-122 (Si queda agua libre en la muestra después de retirar la membrana, se debesecar antes de obtener la humedad). Si los recortes o residuos producto del labrado de la muestra son insuficientes para realizar los ensayos correspondientes a las propiedades índice, la muestra se debe pesar y posteriormente se fragmenta para completar la cantidad requerida para las pruebas de granulometría, límites y humedad final. Es importante, antes de dividirlo o secarlo, tomar fotos del espécimen que muestren el modo de falla (falla frágil, falla abombada, etc.).

## 9 CÁLCULOS

**9.1** Las medidas y los cálculos tendrán 3 dígitos significativos.

**9.2** *Ensayo triaxial tipo no consolidado no drenado:*

- 9.2.1** Se calcula la deformación unitaria axial,  $\epsilon$  (expresada como decimal), para una carga axial dada, así:

$$\epsilon = \Delta H / H_0$$

[153.4]

Donde:  $\Delta H$ : Cambio de altura de la muestra durante la carga, determinado por el indicador de deformación;

$H_0$ : Altura inicial de la muestra menos cualquier cambio en la longitud antes de la carga.

- 9.2.2** Se calcula el área de la sección transversal, A, para una carga axial dada, como sigue:

$$A = A_0 / (1 - \varepsilon)$$

[153.5]

Donde:  $A_0$ : Área promedio inicial de la sección transversal del espécimen,  $\text{cm}^2$  o  $\text{mm}^2$ ;

$\varepsilon$ : Deformación axial (en formato decimal) para una carga axial dada.

*Nota 24: En caso de que la aplicación de la presión de cámara genere un cambio en la longitud del espécimen, se debe corregir  $A_0$ , para reflejar este cambio en volumen. Generalmente, se asume para esto que las deformaciones unitarias laterales son iguales a las verticales. El diámetro después del cambio de volumen está dado por  $D = D_0(1 - \Delta H/H)$ .*

- 9.2.3** Se calcula el esfuerzo desviador o la diferencia de esfuerzos principales,  $\sigma_1 - \sigma_3$ , para una carga axial aplicada, como sigue:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = P/A$$

[153.6]

Donde:  $\sigma_1 - \sigma_3$ : Diferencia de esfuerzos principales o esfuerzo desviador;

P: Carga axial aplicada medida (corregida por efecto del levantamiento y la fricción del pistón de acuerdo con 7.1.2);

A: Área promedio de la sección transversal correspondiente.

- 9.2.4** *Curva esfuerzo-deformación unitaria* – Se prepara una gráfica que muestre la relación entre el esfuerzo desviador (eje de las ordenadas) y la deformación unitaria axial en porcentaje (eje de las abscisas). Se selecciona la resistencia a la compresión y la deformación unitaria axial en la falla, de acuerdo con las definiciones 2.1.1 y 2.1.2.

- 9.2.5** *Corrección por el uso de la membrana de caucho* – Se usa la siguiente ecuación para corregir el esfuerzo desviador por efecto del uso de la membrana de caucho, cuando el error en este esfuerzo debido a la rigidez de la membrana excede 5 %:

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_m = 4E_m t_m \varepsilon_1 / D$$

[153.7]

Donde:  $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_m$ : Corrección por efecto de la membrana, que se aplica sustrayéndola del esfuerzo desviador principal medido;

$D = (4A/\pi)^{0.5}$ : Diámetro del espécimen;

$E_m$ : Módulo de Young del material de la membrana;

$t_m$ : Espesor de la membrana;

$\varepsilon_1$ : Deformación unitaria axial (en forma decimal).

**9.2.5.1** El módulo de Young del material de la membrana se puede determinar así: se cuelga una tira de membrana de 10 mm de ancho sobre una varilla delgada; se coloca otra varilla a través de la parte inferior de la membrana colgada y se mide la fuerza necesaria para estirar la membrana. El valor del módulo se obtiene a partir de la expresión:

$$E_m = (F / A_m) / (\Delta L / L)$$

[153.8]

Donde:  $E_m$ : Módulo de Young del material de la membrana (para membranas de látex, el valor típico del módulo es de 1400 kN/m<sup>2</sup>);

$F$ : Fuerza aplicada para estirar la membrana;

$L$ : Longitud (sin estirar) de la membrana;

$\Delta L$ : Cambio en la longitud de la membrana debido a la fuerza,  $F$ ;

$A_m$ : Dos veces el espesor inicial de la membrana multiplicado por su ancho =  $2t_m W_s$ .

*Nota 25: El efecto de la rigidez de la membrana sobre el esfuerzo lateral es despreciable en la mayoría de los casos.*

*Nota 26: Las correcciones por efecto de las membranas se basan en suposiciones hechas a partir de su comportamiento durante el corte. Su comportamiento real es complejo y no existe consenso sobre correcciones más exactas.*

- 9.2.6** Se calculan los esfuerzos principales mayor y menor en la falla, como sigue:

$\sigma_3$ : Esfuerzo principal menor total = presión de cámara;

$\sigma_1$ : Esfuerzo principal mayor total = esfuerzo desviador en la falla más presión de cámara.

- 9.2.7** Se calcula el grado inicial de saturación del espécimen del ensayo, usando los datos iniciales de dimensiones y masa.

*Nota 27: La gravedad específica de sólidos se determina de acuerdo con la norma INV E-128 y puede ser tomada de ensayos previos.*

### **9.3** *Ensayo triaxial tipo consolidado no drenado:*

*Nota 28: Sólo se muestran cálculos en unidades del sistema internacional. Para emplear otras unidades, se deben usar las conversiones apropiadas para mantener la consistencia.*

- 9.3.1** *Propiedades iniciales del espécimen* – Conocida la masa seca total del espécimen, se calculan y anotan el contenido de humedad inicial, el volumen de sólidos, la relación inicial de vacíos, el porcentaje inicial de saturación y el peso unitario seco inicial. Se calcula el volumen de la probeta a partir de los valores medidos en 5.4. Se calcula el volumen de sólidos dividiendo la masa seca del espécimen por la gravedad específica de sólidos (nota 27) y dividiendo por la densidad del agua. La relación de vacíos se determina dividiendo el volumen de vacíos por el volumen de sólidos, asumiendo el volumen de vacíos como la diferencia entre el volumen de la muestra y el volumen de los sólidos. Se calcula la densidad seca, dividiendo la masa seca del espécimen por su volumen.

- 9.3.2** *Propiedades del espécimen después de la consolidación* – Se calculan la altura y el área de la muestra después de la consolidación, como sigue:

**9.3.2.1** La altura de la probeta después de la consolidación se determina con la ecuación:

$$H_c = H_0 - \Delta H_0$$

[153.9]

Donde:  $H_0$ : Altura inicial del espécimen, mm o cm;

$\Delta H_0$ : Cambio de altura al final de la consolidación, mm o cm.

**9.3.2.2** El área de la sección transversal de la probeta después de la consolidación,  $A_c$ , se puede calcular usando uno de los siguientes métodos. El método A se emplea cuando los datos de corte se van calculando a medida que se realiza el ensayo. Adicionalmente, se puede elegir éste o el método B, a criterio del ingeniero, cuando se considere que los parámetros de cálculo requeridos son más representativos del estado de la muestra después de la consolidación. Como alternativa, resulta aceptable usar el promedio de las áreas calculadas por los dos métodos.

**9.3.2.2.1** *Método A:*

$$A_c = [V_0 - \Delta V_{sat} - \Delta V_c] / H_c$$

[153.10]

Donde:  $A_c$ : Área después de la consolidación,  $\text{cm}^2$  o  $\text{m}^2$ ;

$V_0$ : Volumen inicial del espécimen,  $\text{cm}^3$  o  $\text{m}^3$ ;

$\Delta V_c$ : Cambio en el volumen del espécimen durante la consolidación, de acuerdo con las lecturas de la bureta,  $\text{cm}^3$  o  $\text{m}^3$ ;

$\Delta V_{sat}$ : Cambio en volumen del espécimen durante la saturación,  $\text{cm}^3$  o  $\text{m}^3$ , calculado como sigue:

$$\Delta V_{\text{sat}} = 3V_0 [\Delta H_s / H_0]$$

[153.11]

Donde:  $\Delta H_s$ : Cambio en altura del espécimen durante saturación, mm, cm, o m.

#### 9.3.2.2.2 Método B:

$$A_c = (V_{wf} + V_s) / H_c$$

[153.12]

Donde:  $V_{wf}$ : Volumen final de agua (basado en la humedad final),  $\text{cm}^3$  o  $\text{m}^3$ ;

$V_s$ : Volumen de sólidos,  $\text{cm}^3$  o  $\text{m}^3$ , que se calcula así:

$$V_s = w_s / (G_s \rho_w)$$

[153.13]

Donde:  $w_s$ : Masa seca del espécimen, g;

$G_s$ : Gravedad específica de los sólidos;

$\rho_w$ : Densidad del agua a  $20^\circ \text{C}$ ,  $0.9982 \text{ g/cm}^3$ .

**9.3.2.3** Se determinan la relación de vacíos después de la consolidación y el porcentaje de saturación, usando las dimensiones calculadas del espécimen después de la consolidación, y asumiendo que la humedad después de la consolidación es la humedad final.

*Nota 29: Cuando se considere significativa la cantidad de agua que absorbe el espécimen, proveniente de los discos porosos y de las líneas de drenaje durante el tiempo en que está siendo removido del aparato triaxial, se recomienda emplear el método A.*

*Nota 30: En este ensayo, las ecuaciones están escritas de tal manera que la consolidación y la compresión se consideran positivas.*

### 9.3.3 Datos del corte:

**9.3.3.1** Se calcula la deformación axial,  $\varepsilon_1$ , para una carga dada, así:

$$\varepsilon_1 = \Delta H / H_c$$

[153.14]

Donde:  $\Delta H$ : Cambio de altura de la muestra durante la carga, determinado por las lecturas del indicador de deformación, mm o cm;

$H_c$ : Altura de la muestra después de la consolidación, mm o cm.

**9.3.3.2** Se calcula el área de la sección transversal A, para una carga axial dada, como sigue:

$$A = A_c / (1 - \varepsilon_1)$$

[153.15]

Donde:  $A_c$ : Área promedio de la sección transversal del espécimen después de la consolidación,  $\text{cm}^2$  o  $\text{m}^2$ ;

$\varepsilon_1$ : Deformación axial (en formato decimal) para la carga axial dada.

*Nota 31: El área transversal calculada de esta manera se basa en la premisa de que el espécimen se deforma como un cilindro circular recto durante el corte. En casos en los cuales se produzca un hinchamiento localizado, es posible determinar valores más aproximados del área a partir de las medidas del espécimen tomadas después del corte.*

**9.3.3.3** Se calcula el esfuerzo desviador o la diferencia de esfuerzos principales medidos,  $\sigma_1 - \sigma_3$ , para una carga axial aplicada, como sigue:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = P/A$$

[153.16]

Donde:  $\sigma_1 - \sigma_3$ : Diferencia de esfuerzos principales o esfuerzo desviador,  $\text{kN/m}^2 = \text{kPa}$ ;

P: Carga axial aplicada dada (corregida por efecto del levantamiento y la fricción del pistón, si se requiere), kN.

A: Área de la sección transversal correspondiente,  $\text{cm}^2$  o  $\text{m}^2$ .

**9.3.3.3.1** *Corrección por efecto de las tiras o bandas de papel de filtro* – Para tiras verticales de papel filtro que se extiendan sobre el total de la altura de la muestra, se debe aplicar una corrección sobre el esfuerzo desviador cuando el error en éste debido a la resistencia de las bandas de papel filtro excede de 5 %.

(1) Para valores de deformación unitaria axial superiores a 2 %, se debe usar la siguiente ecuación para calcular la corrección:

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{fp} = K_{fp} P_{fp} / A_c$$

[153.17]

Donde:  $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{fp}$ : Corrección por uso del papel filtro, que se debe restar del esfuerzo desviador medido,  $\text{kN}/\text{m}^2$  = kPa;

$K_{fp}$ : Carga soportada por las bandas de papel filtro, calculada por unidad de longitud de perímetro cubierto por el papel, en  $\text{kN}/\text{mm}$  o  $\text{kN}/\text{m}$  (Ver nota 32);

$P_{fp}$ : Perímetro cubierto por el papel filtro, mm o m;

$A_c$ : Área promedio de la sección transversal del

espécimen después de la consolidación,  $\text{cm}^2$  o  $\text{m}^2$ ;

(2) Para valores de deformación unitaria axial de 2 % o menores, se debe usar la siguiente ecuación para calcular la corrección:

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_{fp} = 50 \epsilon_1 K_{fp} P_{fp} / A_c \quad [153.18]$$

Donde: 50: Deformación unitaria axial límite en formato decimal;

$\epsilon_1$ : Deformación unitaria axial (en formato decimal) para la carga axial dada. Los demás términos se definieron en el sub-parágrafo (1) de este numeral

*Nota 32: Para el papel filtro que se usa generalmente en los ensayos de triaxial,  $K_{fp}$  es, aproximadamente, 0.00019 kN/mm (1.1 lbf/pg).*

#### 9.3.3.3.2

*Corrección por el uso de la membrana de caucho*  
– Se emplea la siguiente ecuación para corregir el esfuerzo desviador por efecto del uso de la membrana de caucho, cuando el error en este esfuerzo debido a la rigidez de la membrana excede de 5 %:

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_m = (4E_m t_m \epsilon_1) / D_c \quad [153.19]$$

Donde:  $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_m$ : Corrección por efecto de la membrana, que se aplica sustrayéndola del esfuerzo desviador principal medido,  $\text{kN/m}^2 = \text{kPa}$ ;

$D_c = (4A_c/\pi)^{0.5}$ : Diámetro del espécimen después de la consolidación,  $\text{mm}$  o  $\text{cm}$ ;

$E_m$ : Módulo de Young para el material de la membrana,  $kN/m^2 = kPa$ ;

$t_m$ : Espesor de la membrana, mm o cm;

$\epsilon_1$ : Deformación unitaria axial (en forma decimal).

(1) El módulo de Young del material de la membrana se puede determinar así: se cuelga una tira de membrana de 15 mm de ancho sobre una varilla delgada; se coloca otra varilla a través de la parte inferior de la membrana colgada y se mide la fuerza necesaria para estirar la membrana. El valor del módulo se obtiene a partir de la expresión:

$$E_m = (F/A_m) / (\Delta L/L)$$

[153.20]

Donde:  $E_m$ : Módulo de Young del material de la membrana (nota 33);

$F$ : Fuerza aplicada para estirar la membrana;

$L$ : Longitud (sin estirar) de la membrana;

$\Delta L$ : Cambio en la longitud de la membrana debido a la fuerza,  $F$ ;

$A_m$ : Dos veces el espesor inicial de la membrana multiplicado por su ancho =  $2 t_m W_s$ .

*Nota 33: Para membranas de látex, el valor típico de  $E_m$  es de 1400  $kN/m^2$  (200 kPa)*

*Nota 34: Las correcciones por efecto de las bandas de papel de filtro y de las membranas, se basan en suposiciones hechas a partir de su comportamiento durante el corte. Su comportamiento real es complejo y no existe consenso sobre correcciones más exactas.*

**9.3.3.3.3** *Esfuerzo desviador principal corregido* – Este valor se calcula como sigue:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{c,p} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{fp} - (\sigma_1 - \sigma_3)_m \quad [153.21]$$

Donde:  $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ : Diferencia corregida de esfuerzos principales o esfuerzo desviador corregido,  $\text{kN/m}^2 = \text{kPa}$ .

**9.3.3.4** Se calcula el esfuerzo efectivo principal menor,  $\sigma_3'$ , para una carga axial aplicada, como sigue:

$$\sigma_3' = \sigma_3 - \Delta u \quad [153.22]$$

Donde:  $\sigma_3'$ : Esfuerzo efectivo principal menor para la carga axial dada,  $\text{kPa}$ ;

$\sigma_3$ : Esfuerzo principal menor para la carga axial dada,  $\text{kPa}$ ;

$\Delta u$ : Presión de poros inducida para la carga axial dada (presión total de poros menos contrapresión total),  $\text{kPa}$ .

**9.3.4** *Curvas de deformación unitaria contra presión de poros inducida y esfuerzo desviador* – Se deben preparar gráficas que muestren las relaciones entre el esfuerzo desviador y la presión de poros inducida (ambas en las ordenadas) con la deformación unitaria axial (en el eje de las abscisas). Se selecciona el esfuerzo desviador (diferencia de esfuerzos principales) y la deformación axial en la falla, de acuerdo con el numeral 2.1.1.

**9.3.5** *Diagrama  $p'-q$*  – Se debe preparar una gráfica que muestre la relación entre  $p'$  y  $q$ , dibujando  $q$  en las ordenadas y  $p'$  en las abscisas, usando la misma escala. Los valores de  $p'$  y  $q$  para una carga axial dada, se calculan como sigue:

$$n' = \frac{[(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf} + 2\sigma'_3]}{2} = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \quad [153.23]$$

$$\alpha = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}}{2} \quad [153.24]$$

Donde:  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}$ : Diferencia corregida de esfuerzos principales o esfuerzo desviador corregido, kN/m<sup>2</sup> = kPa;

$\sigma'_3$ : Esfuerzo principal menor efectivo, kPa.

- 9.3.6** Se determinan los esfuerzos principales mayor y menor en la falla, en términos de esfuerzos totales,  $\sigma_{1f}$  y  $\sigma_{3f}$  respectivamente, y de esfuerzos efectivos,  $\sigma'_{1f}$  y  $\sigma'_{3f}$ , respectivamente, como sigue:

$\sigma'_{3f}$  = esfuerzo efectivo de consolidación

$$\sigma_{1f} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{cf} + \sigma_{3f} \quad [153.25]$$

$$\sigma'_{3f} = \sigma_{3f} - \Delta u_f \quad [153.26]$$

$$\sigma'_{1f} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{cf} + \sigma'_{3f} \quad [153.27]$$

Donde :  $\Delta u_f$ : presión de poros inducida en la falla.

- 9.3.7** *Círculos de esfuerzos Mohr* – Se pueden construir los círculos de esfuerzos de Mohr en la falla, con base en esfuerzos efectivos y en esfuerzos totales, sobre una gráfica que tiene por ordenadas los esfuerzos de corte y por abscisas los esfuerzos normales, usando las mismas escalas (Figura 153 - 4). El círculo de esfuerzos totales se dibuja tomando como radio la mitad del esfuerzo desviador a la falla y como centro, la semisuma de los esfuerzos principales totales mayor y menor. El círculo de Mohr basado en esfuerzos efectivos se construye de igual manera, excepto que el centro es la semisuma de los esfuerzos principales efectivos mayor y menor.

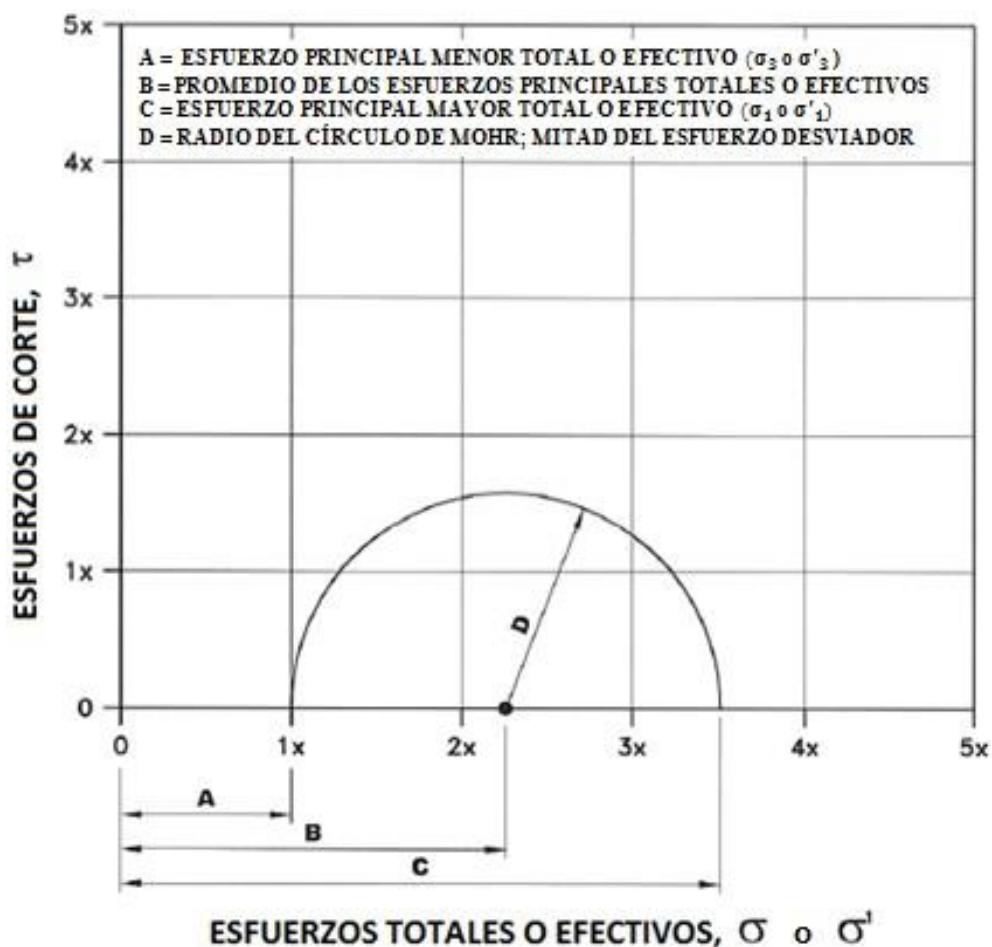


Figura 153 - 4. Construcción del círculo de esfuerzos de Mohr

## 10 INFORME

**10.1** Para cada uno de los ensayos descritos en esta norma, se debe incluir la siguiente información (no todos los datos solicitados aplican para el ensayo triaxial no consolidado no drenado, UU):

**10.1.1** Identificación y descripción visual del espécimen, incluyendo la clasificación del suelo y el tipo de muestra (inalterada, reconstituida, o preparada de otra manera).

**10.1.2** Límites de Atterberg, de acuerdo con las normas INV E-125 e INV E-126.

**10.1.3** Gravedad específica de sólidos, según la norma de ensayo INV E-128.

**10.1.4** Análisis granulométrico (Norma INV E-123).

**10.1.5** Valores iniciales de peso unitario seco, relación de vacíos, humedad, porcentaje de saturación (especificar si la humedad fue obtenida de la muestra total o de cortes al conformarla).

*Nota 35: Es necesario conocer la gravedad específica para el cálculo de la saturación. Se debe informar cuando la gravedad específica tomada para este ensayo sea asumida.*

**10.1.6** Altura y diámetro inicial del espécimen.

**10.1.7** Método seguido para saturar el espécimen (método seco o húmedo).

**10.1.8** Contrapresión.

**10.1.9** Parámetro de presión de poros B al final de la saturación.

**10.1.10** Esfuerzo efectivo de consolidación.

**10.1.11** Tiempo para el 50 % de la consolidación primaria.

**10.1.12** Peso unitario seco, relación de vacíos, humedad y porcentaje de saturación después de la consolidación.

**10.1.13** Área de la sección transversal de la muestra después de la consolidación y método usado para calcularla.

**10.1.14** Criterio de falla usado.

**10.1.15** Valor del esfuerzo desviador en la falla y los valores de los esfuerzos principales efectivos mayor y menor en la falla (indicando las correcciones hechas por membrana y/o papel filtro).

**10.1.16** Deformación unitaria axial en la falla, en porcentaje.

**10.1.17** Velocidad de deformación unitaria, porcentaje por minuto.

**10.1.18** Resistencia a la compresión y valores de los esfuerzos principales mayor y menor en el momento de la falla (ensayo UU); indicando si los valores fueron corregidos por efecto de la membrana.

**10.1.19** Curva esfuerzo-deformación unitaria; ver 9.2.4.

**10.1.20**Curvas de esfuerzo desviador y presión de poros inducida versus deformación unitaria axial, como se describe en 9.3.4.

**10.1.21**Diagrama  $p'$  –  $q$ , numeral 9.3.5.

**10.1.22**Círculos de esfuerzos de Mohr basados en esfuerzos totales y efectivos (opcional).

**10.1.23**Pendiente del ángulo de la superficie de falla (opcional).

**10.1.24**Esquema o fotografía de la muestra fallada.

**10.1.25**Comentarios y anotaciones sobre condiciones inusuales como superficies de deslizamiento, estratificación, presencia de guijarros, conchas, raíces, y cualquier otra información pertinente para interpretar los resultados obtenidos, incluyendo las alteraciones del procedimiento descrito en la norma.

## 11 PRECISIÓN Y SESGO

---

**11.1** *Precisión* – No hay datos disponibles sobre precisión del ensayo debido a la naturaleza de los materiales ensayados. Adicionalmente, no es posible o resulta demasiado costoso contar con 10 o más laboratorios que participen simultáneamente en un programa de ensayos a petición.

**11.2** *Sesgo* – No hay valores de referencia aceptados para este método de ensayo, de allí que no se pueda determinar el sesgo.

## 12 NORMAS DE REFERENCIA

---

ASTM D 4767 – 11

ASTM D 2850/03a (reaprobada 2007)