

CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS

INV E – 151 – 13

1 OBJETO

1.1 Esta norma describe el procedimiento para determinar la magnitud y la velocidad de consolidación de muestras de suelos mediante una prueba de laboratorio en la cual se permite el drenaje axial de especímenes confinados lateralmente, mientras se someten a incrementos de carga con esfuerzo controlado. Para la ejecución del ensayo se puede seguir uno de los siguientes métodos:

1.1.1 *Método A* – Este método se desarrolla aplicando de manera constante cada incremento de carga durante veinticuatro (24) horas o múltiplos de este tiempo. Las lecturas tiempo-deformación se deben realizar, como mínimo, durante dos incrementos de carga. Este método proporciona solamente la curva de compresión de la muestra y los resultados combinan las deformaciones debidas a consolidación primaria y a consolidación secundaria.

1.1.2 *Método B* – Por este método, las lecturas de tiempo-deformación se hacen para todos los incrementos de carga. Los incrementos de carga se aplican: (a) después de alcanzado el 100 % de la consolidación primaria, o (b) a incrementos constantes de tiempo, como se describe en el método A. Como resultados, se obtienen la curva de compresión con datos explícitos para definir los datos correspondientes a la consolidación secundaria, el coeficiente de consolidación para materiales saturados y la velocidad de la compresión secundaria.

Nota 1: El método para la determinación de la velocidad y magnitud de la consolidación del suelo cuando es sometido a ensayos de carga bajo deformación unitaria controlada se puede consultar en la norma ASTM D4186.

1.2 Generalmente, estos ensayos se efectúan sobre muestras de suelos finos saturadas e inalteradas, naturalmente sedimentados en agua; sin embargo, el procedimiento básico también es aplicable a muestras de suelos compactados y a muestras inalteradas de suelos formados por procesos diferentes, tales como alteración química y meteorización. Las técnicas de evaluación especificadas en estos métodos de ensayo asumen que los poros del suelo están

completamente saturados y, por tanto, son aplicables a suelos sedimentados naturalmente en agua. La ejecución de estos ensayos puede

requerir técnicas especiales de evaluación, cuando se trata de suelos no saturados tales como los suelos residuales (por meteorización y alteración química) y los compactados. En particular, la interpretación de las curvas de tiempo para encontrar la velocidad de consolidación, sólo se aplica para suelos saturados.

- 1.3** Es responsabilidad del cliente especificar la magnitud y la secuencia de cada incremento de carga, incluyendo la ubicación del ciclo de rebote, si se requiere; se deben definir, también, en caso de emplear el método A, los incrementos de carga para los cuales se harán las lecturas tiempo- deformación. El nivel de esfuerzo máximo requerido depende del propósito del ensayo y se debe definir con el cliente. En ausencia de instrucciones específicas, se deben aplicar los incrementos y la duración de cargas descritos en la Sección 10.

Nota 2: Las lecturas tiempo-deformación se emplean para determinar el tiempo que tomará la consolidación primaria y para evaluar el coeficiente de consolidación c_v . Puesto que c_v varía con el nivel de esfuerzos y el tipo de carga (en carga o descarga), los intervalos durante los cuales se desean realizar las lecturas tiempo-deformación se deben seleccionar con referencia al proyecto específico en el método

A. Alternativamente, el cliente puede solicitar el método B, donde las lecturas tiempo-deformación se toman para todos los incrementos de carga.

- 1.4** Estos métodos de ensayo no se refieren al uso del sistema de contrapresión para saturar la muestra. Existen otros equipos aptos para realizar el ensayo de consolidación con saturación por contrapresión. La saturación por contrapresión no constituye una inconformidad con estos métodos de ensayo.
- 1.5** La precisión y la exactitud con la cual sean empleados los resultados de estos ensayos en procesos de diseño u otros usos, no forman parte del alcance de esta norma.
- 1.6** Esta norma reemplaza la norma INV E-151-07.

2 DEFINICIONES

- 2.1** *Deformación axial* – Cambio en la dimensión axial de la muestra que se puede expresar en términos de longitud, altura del espécimen, deformación unitaria o relación de vacíos.
- 2.2** *Presión o esfuerzo estimado de pre-consolidación* – Valor del esfuerzo de pre-

consolidación determinado por la técnica descrita en esta norma, con el fin de ayudar a la ejecución del ensayo en el laboratorio. No se debe considerar que

esta estimación es equivalente a una interpretación profesional de las medidas efectuadas durante el ensayo.

- 2.3** *Carga* – En el contexto de los ensayos de suelos, el acto de aplicar fuerza o deformación a la muestra. En el ensayo de consolidación unidimensional, la carga vertical se aplica usando pesas colocadas sobre un gancho.
- 2.4** *Incremento de carga* – Etapa del ensayo en la cual la muestra está bajo un esfuerzo axial total constante.
- 2.5** *Duración del incremento de carga* – Lapso durante el cual la muestra está bajo un esfuerzo total constante.
- 2.6** *Relación de incremento de carga, RIC* – Aumento o disminución del esfuerzo axial total que se va a aplicar a la muestra en el siguiente paso, dividido por el esfuerzo axial total actual.
- 2.6.1** *Aclaración* – La relación de incremento de carga refleja el hecho de que el ensayo se desarrolla adicionando gradualmente pesos para aplicar el esfuerzo axial total a la muestra.
- 2.7** *Esfuerzo axial total* – La fuerza que actúa sobre la muestra, dividida por el área de ésta. Una vez se ha completado la consolidación, se considera que el esfuerzo axial efectivo es igual al esfuerzo axial total.
- 2.8** *Incremento de esfuerzo axial total* – El cambio (incremento o disminución) en el esfuerzo axial total aplicado en una etapa.

3 RESUMEN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO

- 3.1** En estas pruebas de laboratorio, se toma una muestra de suelo, se confina lateralmente y se carga en dirección axial con incrementos de esfuerzo total. Cada incremento de carga se mantiene constante hasta cuando el exceso de presión de poros se haya disipado. Esta situación se identifica por medio de la interpretación del comportamiento tiempo-deformación bajo esfuerzo total constante y se basa en la premisa de que el suelo está 100 % saturado. Durante el ensayo se mide el cambio de altura de la muestra y se determina la relación

entre el esfuerzo axial efectivo y la relación de vacíos o la deformación unitaria. Cuando se toman las lecturas de tiempo-deformación durante la aplicación de un incremento de carga, se puede calcular la velocidad de consolidación con el coeficiente de consolidación.

4 IMPORTANCIA Y USO

- 4.1** Los datos del ensayo de consolidación se emplean para estimar la magnitud y velocidad de los asentamientos diferenciales y totales de una estructura o de un terraplén. Estos datos son esenciales para diseñar las estructuras civiles y evaluar su comportamiento.
- 4.2** Los resultados obtenidos se ven afectados considerablemente por la alteración de las muestras. Por lo tanto, es muy importante seguir un proceso cuidadoso de selección y preparación de la muestra, con el objeto de minimizar las alteraciones.
- 4.3** Los resultados de los ensayos de consolidación dependen de la magnitud de los incrementos de carga. Tradicionalmente, el esfuerzo axial aplicado en un intervalo es el doble del correspondiente al intervalo anterior, lo que resulta en una relación de incremento de carga de 1.0. En muestras inalteradas, este procedimiento permite estimar el esfuerzo de pre-consolidación usando técnicas de interpretación establecidas. El ensayo se puede usar para modelar situaciones particulares de campo o encontrar parámetros especiales; se puede variar, por ejemplo, el esquema o programa tradicional de incrementos de carga de acuerdo con los requerimientos del proyecto. También, se puede inundar y cargar la muestra de acuerdo con los patrones de carga o de humedad esperados en terreno para evaluar mejor la respuesta del suelo. Las relaciones de incremento de carga menores que la unidad son aconsejables cuando el suelo es altamente sensitivo o su respuesta es altamente dependiente de la velocidad de deformación.
- 4.4** El método para encontrar la presión de pre-consolidación en estas pruebas permite verificar si se tomó un juego de lecturas de tiempo - deformación con posterioridad al esfuerzo de pre-consolidación y si el espécimen fue sometido a un nivel de esfuerzo suficientemente alto. Se pueden emplear técnicas alternativas para estimar el esfuerzo de pre-consolidación previo acuerdo con el laboratorio, pero siempre de conformidad con estos métodos de ensayo.
- 4.5** Los resultados de los ensayos de consolidación dependen de la duración de cada incremento de carga. Tradicionalmente, la duración de la carga es la misma para cada incremento e igual a 24 horas. Para algunos suelos, la velocidad de consolidación es tal, que la consolidación completa (disipación del exceso de presión de poros) requiere más tiempo. El aparato no posee mecanismos para verificar la disipación de la presión de poros. Es necesario emplear una técnica de interpretación que determine indirectamente si la consolidación se ha completado. Esta norma especifica procedimientos para

dos técnicas (Métodos A y B); no obstante, se pueden emplear técnicas diferentes previo acuerdo con el laboratorio y de conformidad con estos métodos de ensayo.

- 4.6** Los aparatos empleados para este ensayo no cuentan con dispositivos para verificar el grado de saturación de la muestra. La mayoría de las muestras inalteradas que se toman bajo el nivel freático están saturadas. Sin embargo, la velocidad de deformación durante el tiempo es muy sensible al grado de saturación y se debe tener precaución con las estimaciones sobre el tiempo de asentamiento en suelos en los que prevalece la condición de saturación parcial. La inundación de la muestra no cambia significativamente su grado de saturación, sino que suministra agua para eliminar presiones de poros negativas asociadas con el muestreo y previene la evaporación durante la prueba. La magnitud del efecto de la saturación parcial sobre los resultados del ensayo puede formar parte de la evaluación del mismo y puede incluir la aplicación de modelos teóricos diferentes de los de la teoría de consolidación convencional. Es posible, por otra parte, realizar el ensayo usando un aparato equipado para saturar el espécimen.
- 4.7** Estos métodos de ensayo usan la teoría convencional de la consolidación basada en la ecuación de consolidación de Terzaghi para calcular el coeficiente de consolidación, c_v . El análisis se basa en los siguientes supuestos:
- 4.7.1** El suelo está saturado y tiene propiedades homogéneas.
 - 4.7.2** El flujo del agua de los poros se produce en dirección vertical.
 - 4.7.3** La compresibilidad de las partículas de suelo y del agua de poros es despreciable frente a la compresibilidad del esqueleto del suelo.
 - 4.7.4** La relación esfuerzo-deformación es lineal bajo el incremento de carga.
 - 4.7.5** La relación permeabilidad-compresibilidad del suelo es constante bajo el incremento de carga.
 - 4.7.6** Aplica la ley de Darcy para flujo a través de medios porosos.

5 EQUIPO

- 5.1** *Dispositivo de carga* – Un dispositivo adecuado para aplicar cargas axiales o esfuerzos totales a la muestra. El dispositivo debe ser capaz de mantener las

cargas especificadas durante períodos prolongados de tiempo con una precisión de $\pm 0.5\%$ de la carga aplicada y debe permitir la aplicación rápida de un incremento de carga dado sin generar ningún impacto significativo. La aplicación de la carga se debe completar en un tiempo correspondiente a 0.01 veces t_{100} o menos.

Nota 3: Como un ejemplo, para suelos en los cuales la consolidación primaria se completa en 3 minutos, la carga aplicada deberá estar estable en menos de 2 segundos.

5.2 Consolidómetro – Un dispositivo para mantener la muestra dentro de un anillo que puede estar fijo a una base o puede ser flotante (sostenido por fricción en la periferia de la muestra), con piedras porosas en cada cara del espécimen. El diámetro interno del anillo debe tener una tolerancia de mínimo 0.1% del mismo. El consolidómetro debe proporcionar, también, un medio para sumergir la muestra en agua, para transmitir la carga concéntrica axial a los discos porosos y para medir la deformación axial del espécimen.

5.2.1 Diámetro mínimo de la muestra – El diámetro mínimo de la muestra o el diámetro interno del anillo, debe ser de 50 mm ($2.0''$).

5.2.2 Altura mínima de la muestra – Su altura mínima inicial debe ser 12 mm ($0.5''$), pero no menor que 10 veces el diámetro máximo de partícula del suelo ensayado.

5.2.3 Relación mínima diámetro–altura – La relación mínima debe ser 2.5.

Nota 4: Se recomienda el uso de relaciones mayores. Para minimizar los efectos de fricción entre la muestra y el interior del anillo, es conveniente emplear una relación mayor que 4.

5.2.4 Rigidez del anillo – El anillo deberá ser suficientemente rígido para prevenir deformaciones laterales significativas durante el ensayo. La rigidez debe ser tal, que bajo condiciones de presión hidrostática en la muestra, el cambio de su diámetro no exceda 0.04% bajo la mayor carga que se aplique.

Nota 5: Por ejemplo, un anillo metálico de 3.2 mm ($1/8''$) de espesor es adecuado para esfuerzos hasta de 6000 kPa (900 lbf/plg^2), para muestras de 63.5 mm ($2.5''$) de diámetro.

5.2.5 Material del anillo – El anillo se debe elaborar con un material que no sea corrosivo en relación con el suelo o el fluido de poros. La superficie interior deberá ser altamente pulida o se deberá recubrir con un

material de baja fricción, como grasa de silicona o bisulfuro de molibdeno. Para suelos no arenosos se puede usar politetrafluoroetileno.

- 5.3** *Discos porosos* – Los discos porosos (piedras porosas) podrán ser de carburo de silicio, de óxido de aluminio o de otro material de rigidez similar, que no se corraa ante el suelo o los fluidos de poros. Los discos deben ser lo suficientemente finos para evitar la penetración del suelo dentro de sus poros pero no el flujo del agua proveniente de la muestra. Aun cuando no se cuenta con un criterio exacto, el factor de impedancia generado por el espesor del disco y su conductividad hidráulica (permeabilidad) debe ser de al menos 100.

Nota 6: El factor de impedancia se define como el cociente entre el producto de la conductividad hidráulica del disco por el espesor de drenaje del suelo y el producto de la conductividad hidráulica del suelo por el espesor de la piedra.

- 5.3.1** *Diámetro* – El diámetro del disco superior debe ser de 0.2 a 0.5 mm (0.01 a 0.02") menor que el diámetro interior del anillo. Cuando se emplea un anillo flotante, el disco del fondo deberá tener el mismo diámetro que el de la parte superior.

Nota 7: El uso de discos tronco-cónicos o ahusados es recomendable para evitar la adhesión del disco a la pared del anillo. El diámetro mayor debe quedar en contacto con el suelo o la pantalla filtrante.

- 5.3.2** *Espesor* – El espesor del disco debe ser suficiente para evitar su rotura. El disco superior se carga a través de una platina resistente a la corrosión, suficientemente rígida para evitar la rotura de éste.

- 5.3.3** *Mantenimiento* – Se recomienda limpiar los discos porosos después de cada uso. Los discos nuevos se deben hervir durante un mínimo de 10 minutos y dejar en agua hasta que se enfríen a temperatura ambiente antes de ser empleados. Inmediatamente después de cada uso, los discos se limpian con un cepillo no abrasivo y se hierven o se someten a ultrasonido para remover las partículas más finas que pueden reducir su permeabilidad.

Nota 8: Se recomienda almacenar los discos porosos en un recipiente con agua de ensayo limpia entre uno y otro ensayo (ver numeral 5.12). Cada ciclo de secado atrae partículas que pueden causar la reducción de la conductividad hidráulica. Cuando se efectúan ensayos que requieren discos secos durante el procedimiento de montaje, ellos se pueden secar con papel absorbente justo antes de la prueba.

- 5.4** *Pantalla filtrante* – Se coloca entre el disco poroso y el espécimen, con el objeto de evitar la intrusión de suelo dentro de aquél. Su presencia se debe tener en cuenta cuando se calcula el factor de impedancia. Puede ser de nylon-

monofilamento o un papel de filtro grado 54, endurecido, de bajo contenido de ceniza.

Nota 9: Los filtros deben tener aproximadamente la misma sección transversal que la muestra. Cuando se sigue el proceso de montaje húmedo, se debe sumergir el papel de filtro, si se usa, en un recipiente con agua para permitir que se equilibre antes del ensayo.

- 5.5** *Cizalla o cortador cilíndrico* – Una plataforma giratoria de corte o un anillo cilíndrico empleado para tallar la muestra hasta conseguir el diámetro interior del anillo del consolidómetro, con una alteración mínima. Un dispositivo de corte que tenga el mismo diámetro interno (o 0.05 mm mayor) que el anillo para la muestra, se deberá instalar o ser integral con el anillo. El elemento de corte debe tener un borde afilado, una superficie altamente pulida y estar recubierto con un material de baja fricción. También, se puede usar un torno de corte. La herramienta de corte debe estar apropiadamente alineada para entregar una probeta del mismo diámetro del anillo.
- 5.6** *Deformímetro* – Para medir el cambio de espesor de la muestra con una resolución de 0.0025 mm (0.0001") o mayor.
- 5.7** *Placa espaciadora (disco espaciador)* – Una placa, usualmente acrílica, con una superficie circular plana y sobresaliente, que se encaja dentro del anillo y se usa para deprimir la superficie de la muestra dentro de éste unos 2 mm (0.08"). Cuando se use un anillo flotante, esta depresión debe ser el doble, razón por la cual se emplea una placa que genere mayor espacio. Estas placas no se necesitan cuando el consolidómetro cuenta con un mecanismo para centrar los discos porosos.
- 5.8** *Balanza* – Empleada para determinar la masa de la muestra más el anillo, etc., con al menos cuatro dígitos significativos.
- 5.9** *Horno* – Termostáticamente controlado, de ventilación forzada, que pueda mantener una temperatura a de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).
- 5.10** *Recipientes para determinar la humedad* – De acuerdo con la norma INV E– 122.
- 5.11** *Ambiente* – A menos que el cliente especifique otra, la temperatura para el ensayo debe estar en el rango de $22 \pm 5^\circ \text{C}$. Adicionalmente, la temperatura del consolidómetro, la muestra y el depósito de inmersión no debe variar en más de $\pm 2^\circ \text{C}$ durante el ensayo. Para tal efecto, el ensayo se desarrolla normalmente en un cuarto con una temperatura relativamente constante. Si un cuarto de estas características no está disponible, el aparato se debe colocar en una cámara aislada u otro dispositivo que mantenga la temperatura dentro de la tolerancia citada anteriormente. El aparato no debe quedar expuesto

directamente a los rayos del sol.

- 5.12** *Agua para el ensayo* – Se necesita agua para saturar los discos porosos y para llenar el depósito de inmersión. Idealmente, el agua debe tener una composición similar a la del fluido de los poros del suelo. Se puede extraer directamente agua de los poros del suelo en el terreno o emplear agua potable, agua desmineralizada o agua salina. El cliente debe especificar el tipo de agua que prefiere. De lo contrario, se usa agua potable del grifo.
- 5.13** *Equipo misceláneo* – Incluye espátulas, navajas y sierras de alambre para preparar la probeta.

6 TOMA DE MUESTRAS

- 6.1** *Recolección* – Las normas INV E–105 e INV E–109 describen los procedimientos y equipos que se usan para obtener muestras inalteradas para ensayo. Las muestras se pueden recortar de muestras inalteradas en bloque tomadas en campo (norma INV E-104). Las probetas remoldeadas se pueden preparar a partir de muestras masivas, con condiciones de humedad y densidad estipuladas por el cliente.
- 6.2** *Transporte* – Las muestras inalteradas se deben conservar, manipular y transportar de acuerdo con las normas dadas para grupos C y D en la norma INV E–103. Las muestras en bloque (masivas) están cubiertas por el grupo B.
- 6.3** *Almacenamiento* – Las muestras selladas se deben almacenar de tal manera que no haya pérdida de humedad, es decir, que no haya evidencias de secamiento parcial en los bordes de las muestras o de agrietamiento. El tiempo de almacenamiento debe ser mínimo, sobre todo cuando el suelo o sus fluidos puedan reaccionar con el tubo que los contiene.
- 6.4** *Alteración* – La calidad del ensayo de consolidación disminuye enormemente con la alteración de la muestra. Ningún procedimiento garantiza la obtención de muestras absolutamente inalteradas. De ahí la importancia de seleccionar adecuadamente las muestras para ensayo.

Nota 10: El examen para verificar la alteración de las muestras se facilita enormemente con radiografías de rayos X (Ver norma ASTM D 4452).

7 CALIBRACIÓN

7.1 *Aparatos de deformación* – Las deformaciones verticales medidas se deben corregir por el efecto de la compresibilidad del aparato, siempre que la deformación del equipo exceda el 0.1 % de la altura inicial de la muestra o cuando se usen discos de papel de filtro. Si se garantiza la corrección en cualquier punto durante el ensayo, entonces es necesario aplicar una corrección a todas las mediciones durante el ensayo, empleando los datos de calibración.

7.1.1 Para su calibración, el consolidómetro se arma tomando en lugar de la muestra un disco de cobre, de aluminio o de acero templado, de aproximadamente la misma altura que una probeta de ensayo y con un diámetro entre 1 mm (0.04") y 5 mm menor que el diámetro del anillo. Se humedecen los discos porosos. Si se van a usar discos de papel de filtro (ver numeral 5.3), se deben humedecer y se debe dejar el suficiente tiempo (mínimo 2 minutos) para permitir que pierdan el contenido de humedad durante cada incremento del proceso de calibración.

7.1.2 Se carga y descarga el consolidómetro como si se tratara del ensayo y se mide la deformación para cada carga aplicada. Cuando se usan pantallas de papel de filtro es necesario que la calibración se desarrolle siguiendo exactamente el programa de carga y descarga que se va a usar durante el ensayo real, debido al comportamiento inelástico de este material. La calibración se debe hacer anualmente o después de cualquier ajuste a los componentes del equipo.

7.1.3 Para cada aplicación de carga, se dibujan o tabulan las deformaciones del aparato (correcciones) que serán aplicadas a las deformaciones leídas durante el ensayo con muestra. El disco metálico también se deformará; sin embargo, esta deformación es despreciable siempre y cuando los niveles de esfuerzo no sean extremadamente grandes, caso en el cual también debe ser tomada en cuenta para añadirla a las correcciones.

7.1.4 Cuando se usan filtros de nylon, es posible representar las correcciones con una ecuación matemática.

7.2 *Elementos de carga misceláneos* – Se debe determinar la masa conjunta (con una precisión de 0.001 kg) del disco poroso superior más el de cualquier otro

dispositivo que descansa sobre la muestra y no sea contrarrestado por elbastidor, M_a .

7.3 *Constantes del equipo* – Se deben medir los siguientes parámetros anualmente o después de cualquier ajuste del equipo:

7.3.1 Altura del anillo, H_r , y diámetro del anillo, D_r , con precisión de 0.01 mm (0.0005"); masa del anillo, M_r , con precisión de 0.01 g.

7.3.2 Espesor de la pantalla de filtro, H_{fs} , con precisión de 0.01 mm (0.0005").

7.3.3 Espesor del resalto de la placa espaciadora, H_{rs} , con precisión de 0.01 mm (0.0005").

8 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

8.1 Se deben reducir las posibilidades de alteración del suelo tanto como sea posible: cambios de humedad, de densidad, etc., así como evitar vibración, distorsión y compresión.

8.2 Las muestras de ensayo se deben preparar en un lugar donde se minimicen los cambios de humedad.

Nota 11: Para este propósito, se recomienda el uso de ambientes con alta humedad.

8.3 Se recorta la muestra (tallar o labrar) y se inserta en el anillo de consolidación. El suelo debe quedar ajustado dentro del anillo, sin vacíos en su perímetro. Cuando las muestras inalteradas provienen de tubos muestreadores, el diámetro interno del tubo debe ser, como mínimo, 5 mm (0.25") mayor que el diámetro interno del anillo de consolidación, excepto en los casos citados en los numerales 8.4 y 8.5. Se pueden usar plataformas giratorias cortantes o anillos cilíndricos cortantes para tallar la muestra de suelo hasta el diámetro adecuado. Cuando se use una plataforma giratoria se debe hacer un corte perimetral completo para reducir el diámetro de la muestra al diámetro interior del anillo de consolidación. Se inserta cuidadosamente la probeta dentro de éste, sin ejercer fuerza, hasta que sobresalga por la base del anillo. Cuando se use un anillo cortante cilíndrico, se debe recortar el suelo hasta una conicidad suave

que se encuentra delante del borde de corte. En seguida, se avanza el cortador una distancia pequeña hasta alcanzar el diámetro final. Se repite el proceso hasta que la muestra sobresalga del anillo.

- 8.4** En suelos fibrosos como la turba y en aquellos que se dañan fácilmente al ser recortados, la muestra se puede transferir directamente desde el tubo que la contiene hasta el anillo, siempre que el diámetro de este último sea el mismo o ligeramente menor.
- 8.5** Las muestras que se obtienen empleando un tomamuestras revestido de anillos, se pueden usar directamente sin recorte previo, cuando han sido extraídas de acuerdo con la norma INV E-109 y cumplen con los requerimientos de rigidez del punto 5.2.4.
- 8.6** Se recorta la muestra a ras con los extremos planos del anillo. En suelos blandos o de consistencia media, se usa una sierra de alambre para minimizar el desmoronamiento. Se puede usar una regla con borde cortante afilado para hacer el labrado final, una vez removido el suelo excedente con la sierra de alambre. En suelos duros, el recorte de las partes superior e inferior se puede hacer solamente con la regla. Si se encuentra alguna partícula pequeña en la superficie que se está cortando, se debe retirar y rellenar el vacío con suelo de los recortes.

Nota 12: Si se encuentran partículas grandes en el material cuando se está recortando, o en la muestra después del ensayo, se debe anotar en el informe esta observación visual o los resultados del ensayo de granulometría de acuerdo con la norma INV E-123 (excepto que el requisito sobre tamaño mínimo de la muestra debe ser ignorado).

- 8.6.1** A menos que el consolidómetro cuente con un medio para centrar los discos porosos, la muestra debe ser deprimida levemente bajo la parte superior del anillo, y también en el fondo cuando se usa anillo flotante. Esto facilita la ubicación de las piedras porosas en el centro. Después de recortar su extremo superior a ras con el anillo, se cubre la muestra con el filtro y se usa el disco espaciador para extrudir parcialmente la muestra desde el fondo del anillo. Se recorta la superficie inferior de la muestra a ras con el anillo. Cuando se emplea anillo flotante, se cubre la superficie con el segundo filtro y se usa el disco espaciador de menor dimensión para empujar la probeta de regreso al anillo.

Nota 13: Si en cualquier etapa del ensayo, la muestra se expande más allá de su altura inicial, el requerimiento sobre restricción lateral del suelo impone el uso de un espécimen deprimido o de un anillo equipado con un collar de extensión del mismo diámetro interior del anillo. En ningún momento se debe permitir que la muestra sobresalga del anillo o del collar de extensión.

- 8.7** Se determina la masa húmeda inicial de la muestra, M_{T_0} , con precisión de 0.01 g, midiendo primero la masa del conjunto muestra-anillo y restando la masa del anillo, M_r .

- 8.8** Se determina la altura inicial de la muestra (H_0) con una precisión de 0.01 mm (0.001"), usando una de las siguientes técnicas:
- 8.8.1** Se toma el promedio de, al menos, cuatro alturas medidas en diferentes puntos mediante el uso de un calibrador. Descontar el espesor del filtro si es del caso.
 - 8.8.2** Se calcula la altura como el espesor del anillo, H_r , menos el espesor de la placa espaciadora, H_{rs} , menos el espesor del filtro, H_{fs} .
- 8.9** Se calcula el volumen inicial de la muestra, V_0 , con una precisión de 0.01 cm³ (0.01 plg³), a partir del diámetro del anillo y de la altura inicial de la muestra.
- 8.10** Si se dispone de suficiente material, se recomienda obtener al menos dos contenidos de humedad natural de acuerdo con el método INV E-122, a partir del material que quedó como residuo del corte o labrado de la muestra.
- 8.11** El material sobrante producto del labrado se puede guardar en un recipiente sellado y se puede emplear para determinar las propiedades índice del suelo, como se describe en la Sección 9.

9 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE DEL SUELO

- 9.1** La determinación de estas propiedades no forma parte de los requerimientos de este ensayo. Cuando se requieren, los ensayos pertinentes se deben hacer sobre el material más representativo posible. En materiales uniformes, todas las pruebas índice se pueden efectuar sobre los residuos de corte adyacentes, recogidos como se indica en el numeral 8.11. Cuando el suelo es heterogéneo o el material es escaso, las pruebas índice se pueden realizar sobre el suelo del espécimen de ensayo, obtenido como se indica en el numeral 10.6, más los residuos representativos recogidos según se describe en el numeral 8.11.
- 9.2** *Gravedad específica* – Se debe determinar de acuerdo con la norma INV E-128 sobre material de la muestra indicada en el numeral 9.1. Para efectos de cálculo (sección 11.2.4) se permite usar la gravedad específica determinada sobre otra muestra de suelo que se juzgue similar a la ensayada, siempre que no se requiera una relación de vacíos exacta.

- 9.3** *Límites de Atterberg* – El límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad se determinan de acuerdo con las normas INV E–125 e INV E–126, usando material de la muestra como se especifica en el numeral 9.1. Estos

datos permiten clasificar el suelo, pero no son un prerrequisito para la realización de este ensayo.

- 9.4 Granulometría** – La determinación de la distribución de los tamaños de las partículas se realiza aplicando la norma INV E–123 (excepto que se debe obviar el requisito sobre el tamaño mínimo de la muestra), sobre una porción de la muestra ensayada (numeral 10.6). Un análisis del tamaño de las partículas resulta útil cuando la inspección visual indica que el suelo contiene una fracción sustancial de material granular grueso. Sin embargo, este ensayo tampoco es prerrequisito para el de consolidación.

10 PROCEDIMIENTO

- 10.1** La preparación de los discos porosos y de otros elementos, depende del tipo de material que se va a ensayar. El consolidómetro se debe ensamblar de manera que se evite un cambio en el contenido de humedad o la expansión de la muestra. Se deben usar discos porosos secos y filtros para ensayar suelos secos altamente expansivos, así como para la generalidad de los suelos. Para ensayar suelos parcialmente saturados, se recomienda usar los discos humedecidos. Los discos saturados se usan solamente cuando el espécimen está saturado y presenta una baja afinidad por el agua. Los discos se preparan usando el agua de ensayo. Se ensamblan en el consolidómetro el anillo con la muestra, los discos porosos y los filtros (cuando son necesarios). Si no se va a inundar la probeta después de la aplicación de la carga de asentamiento (Ver numeral 10.2), el consolidómetro se debe encerrar en una membrana de caucho o plástica suelta, para prevenir el cambio de volumen debido a la evaporación.

Nota 14: Para realizar un ensayo exitoso, no se debe permitir que la muestra se expanda en exceso de su altura inicial antes de que haya sido cargada más allá de su esfuerzo de pre-consolidación. En la norma ASTM D 4546 se presentan procedimientos para la determinación del potencial de expansión o asentamiento unidimensional de suelos cohesivos.

- 10.2** Se coloca el consolidómetro en el aparato de carga y se aplica una carga de asiento que genere un esfuerzo axial total de alrededor de 5 kPa (100 lbf/pie²). Inmediatamente después de la aplicación de esta carga, se ajusta el deformímetro y se registra la deformación inicial, d_0 . De ser necesario, se incrementa la carga de asiento para evitar la expansión. Por el contrario, si 5 kPa son suficientes para generar una consolidación significativa de la muestra, se deberá disminuir la carga de asiento para producir un esfuerzo axial total de 3 kPa (50 lbf/pie²) o menos. Si resulta necesario, se debe esperar a que la

temperatura del consolidómetro se encuentre en el rango permitido, $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

- 10.3** Si el ensayo se efectúa sobre una muestra inalterada que fue saturada bajo condiciones de campo u obtenida bajo el nivel freático, se debe inundar con agua inmediatamente después de la aplicación de la carga de asiento e incrementar la carga rápidamente para evitar su expansión. Se registran la carga aplicada que se necesita para evitar el hinchamiento y la lectura de deformación resultante. Si la inundación de la muestra se hace para simular condiciones especiales, ésta se debe hacer con un esfuerzo axial total suficientemente alto para prevenir la expansión. En tales casos, se aplica la carga requerida y se inunda el espécimen. Se toman lecturas de deformación durante el período de inundación, de acuerdo con el procedimiento descrito en el numeral 10.5. En tales casos, se anota el esfuerzo total axial con inundación y la deformación axial resultante.

Nota 15: El propósito de la inundación de la muestra es el de eliminar la interfaz aire-agua en la periferia del suelo, la cual puede causar presiones de poros negativas. La inundación no genera incremento del grado de saturación de la muestra y no se debe usar para decir que la muestra está completamente saturada.

- 10.4** La muestra se somete a incrementos de esfuerzo axial total constante. La duración de cada incremento estará de acuerdo con las guías del numeral 10.5. El programa de carga depende del objetivo del ensayo, pero debe cumplir las siguientes pautas:

10.4.1 El programa estándar debe incluir una relación de incremento de carga (RIC) de 1.0, lo que logra duplicando el esfuerzo axial total aplicado sobre el suelo, para obtener valores alrededor de 12, 25, 50, 100, 200, etc., kPa (250, 500, 1000, 2000, etc. lbf/pie²).

10.4.2 Cuando se requieran determinar la pendiente y la forma de la curva de compresión virgen o el valor del esfuerzo de pre-consolidación, el esfuerzo axial máximo total debe ser lo suficientemente alto para brindar, ya sea: (a) tres puntos que definan una línea recta cuando se dibujen los esfuerzos en una escala logarítmica (b) tres puntos que definan una curva cóncava cuando se dibujen los esfuerzos en una escala logarítmica, o (c) un nivel de esfuerzos que sea 8 veces el esfuerzo estimado de pre-consolidación. En caso de ser otros los objetivos del ensayo, el esfuerzo axial total máximo se fija de común acuerdo con el cliente.

10.4.3 El programa de descarga o rebote se debe elegir de manera que se divida aproximadamente por dos el esfuerzo anterior aplicado a la muestra (usar el mismo nivel de esfuerzos del numeral 10.4.1, pero en orden inverso). Sin embargo, también se pueden aplicar cargas que

representen una cuarta parte de la anterior, omitiendo otros niveles de esfuerzo.

10.4.4 Cuando se trata de arcillas sobreconsolidadas, se puede obtener una mejor evaluación de los parámetros de recompresión aplicando un ciclo de carga–descarga una vez se ha sobrepasado el esfuerzo de pre-consolidación. El cliente puede definir la magnitud del ciclo de carga y descarga como una especificación del ensayo, teniendo en cuenta que para la descarga se necesitan, al menos, dos decrementos de esfuerzo.

10.4.5 Se puede emplear un programa alternativo de carga, descarga o recarga, que reproduzca cambios de esfuerzo o permita una mejor definición de alguna parte de la curva esfuerzo deformación unitaria axial (curva de compresión), o ayude en la interpretación del comportamiento del suelo in-situ o, sencillamente, sea especificada por el cliente.

Nota 16: Se recomienda emplear pequeños incrementos sobre suelos altamente compresibles, así como para la determinación del esfuerzo de pre-consolidación con mayor precisión. No obstante, se debe tener en cuenta que el empleo de relaciones de incremento de carga menores que 0.7 e incrementos de carga muy cerca al esfuerzo de pre-consolidación pueden impedir la evaluación del coeficiente de consolidación, c_v , y el final de la consolidación primaria, como se explica en la Sección 11.

10.5 Antes de aplicar cada incremento de carga, se registra la altura o el cambio de la misma en la muestra, d_f . Existen dos procedimientos que especifican la secuencia en tiempo de las lecturas durante el incremento de carga y la duración mínima de éste. Frecuentemente, se requieren aplicaciones de carga más prolongadas durante determinados incrementos, con el fin de definir la pendiente de la línea recta característica de la compresión secundaria, a partir de la gráfica de deformación unitaria axial versus logaritmo del tiempo. Para tales incrementos, se deben tomar suficientes lecturas próximas a la finalización cada incremento. No es necesario aumentar la duración de otros incrementos de carga durante el ensayo.

10.5.1 Método A – El tiempo estándar de aplicación de cada incremento de carga es de 24 horas. Durante al menos dos incrementos de carga, incluyendo al menos uno después de exceder el esfuerzo de pre-consolidación, se debe anotar la deformación axial, d , a intervalos de tiempo de aproximadamente 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos y 1, 2, 4, 8 y 24 horas (o 0.09, 0.25, 0.49, 1, 4, 9 minutos, etc., si se usa el procedimiento del numeral 11.5.2 para presentar la información de tiempo versus deformación), una vez se ha aplicado la carga. Se toman suficientes lecturas cuando el final de la duración del incremento está

cercano, para verificar que se ha terminado la consolidación primaria. En algunos suelos (ver numerales 11.5.1.1 y 11.5.2.3) es necesario emplear un período de carga mayor que 24 horas para completar la consolidación primaria. Para estos casos, la duración del incremento se toma como algún múltiplo de 24 horas y debe ser tomada como la duración estándar para todos los incrementos del ensayo. La decisión para usar un tiempo mayor se basa en la experiencia con determinados tipos de suelo. Si existe alguna duda sobre si 24 h es un período adecuado, se debe realizar un registro de deformación axial contra tiempo para los incrementos de carga iniciales, con fin de verificar la idoneidad del período de 24 h. Para incrementos de carga en los cuales no se necesite tomar datos de tiempo versus deformación, de todas maneras se deja la carga el mismo tiempo que cuando sí se necesita tomarlos.

10.5.2 Método B – Para cada incremento, se anota la deformación axial, d , a intervalos de tiempo de aproximadamente 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos y 1, 2, 4, 8 y 24 horas (o 0.09, 0.25, 0.49, 1, 4, 9 minutos, etc., si se usa el procedimiento del numeral 11.5.2 para presentar la información de tiempo versus deformación), a partir del momento de aplicación de cada incremento de carga. La duración de cada incremento debe ser superior al tiempo requerido para completar la consolidación primaria, tal como se establece en los numerales 11.5.1.1, 11.5.2.3, o a criterio del cliente. Para cualquier incremento de carga en el cual sea imposible verificar el fin de la consolidación primaria (debido por ejemplo a baja relación de incremento de carga, alta sobreconsolidación durante los incrementos de recompresión o consolidación rápida), la duración del incremento de carga debe ser constante y debe exceder el tiempo requerido para conseguir la consolidación primaria de un incremento aplicado después del esfuerzo de pre-consolidación y a lo largo de la curva de compresión virgen. Cuando se necesite evaluar la compresión secundaria, se aumenta la duración del incremento de carga tanto como para definir su velocidad.

Nota 17: Los intervalos de tiempo sugeridos para registrar la deformación axial, corresponden a suelos e incrementos de carga típicos. Muchas veces es necesario cambiar la frecuencia de las lecturas para mejorar la interpretación de los datos. Una consolidación más rápida requiere un mayor número de lecturas. Para la mayoría de los suelos, la consolidación primaria durante los primeros decrementos de carga se completará en menor tiempo (típicamente un décimo) que el requerido para un incremento de carga a lo largo de la curva de compresión virgen. Sin embargo, a muy bajos esfuerzos el tiempo de rebote puede ser mayor.

- 10.6** Para minimizar el hinchamiento durante el desmonte, se lleva la muestra nuevamente hasta la carga de asiento (alrededor de 5 kPa de esfuerzo total axial). Cuando el cambio en la deformación axial se ha reducido a menos de 0.2 % por hora (usualmente durante la noche), se registra la deformación axial final del ensayo, d_{et} , se libera la carga final de asiento y se remueve rápidamente el consolidómetro del marco de carga. Se remueven del consolidómetro la muestra y el anillo y se seca cualquier agua presente en ellos.
- 10.7** Se mide la altura del espécimen, H_{et} , con una aproximación de 0.01 mm (0.001") tomando el promedio de al menos 4 medidas hechas con comparador de dial u otro aparato apropiado en diferentes puntos uniformemente espaciados en las superficies superior e inferior.
- 10.8** Se determina la masa total de la probeta, M_T , con aproximación de 0.01 g, midiendo primero el conjunto anillo-muestra y restando después la masa del anillo.
- 10.9** La manera más precisa de determinar la masa seca del espécimen y el contenido de agua es secando la muestra total al final del ensayo, de acuerdo con el procedimiento de la norma INV E-122. Si la muestra es homogénea y se dispone de material adicional suficiente producto del recorte o labrado de la muestra para realizar las pruebas de propiedades índice, entonces el contenido final de agua, w_f , y la masa de los sólidos, M_d , se determinan usando el espécimen completo. Si el suelo es heterogéneo o no sobra suficiente material para determinar dichas propiedades, entonces se toma una pequeña cuña de la muestra para determinar el contenido final de agua, w_f , y el resto se emplea para determinar las propiedades índice.

11 CÁLCULOS

- 11.1** Los cálculos mostrados emplean el sistema internacional de medidas. Se pueden emplear otras unidades si se utilizan los factores adecuados de conversión y se mantiene la consistencia a través de todos los cálculos.
- 11.1.1** En cada ecuación se emplea la unidad más conveniente para cada variable (por ejemplo, porcentaje o decimal, segundos o minutos, kilogramos o gramos).
- 11.1.2** Cuando se trabaja en diferentes unidades, es necesario calcular valores

comparables para alcanzar el mismo número de dígitos significativos.

11.2 Propiedades físicas de la muestra:**11.2.1** Se obtiene la masa seca de la muestra con la expresión:

$$M_{T_f} = \frac{M_{T_f}}{1 + w_{f_m}} \quad [151.1]$$

Donde: M_d : Masa seca del espécimen total, g (aproximada a 0.01);

M_{T_f} : Masa total del espécimen después del ensayo, g (aproximada a 0.01);

w_{fp} : Contenido de agua de la cuña de espécimen tomada después del ensayo, en forma decimal (aproximación de 0.0001).

11.2.2 Se calculan los contenidos de agua (humedad) inicial y final del espécimen, en porcentaje, como sigue:

$$\text{Humedad inicial: } w_0 = \frac{M_d}{M_d} \times 100 \quad [151.2]$$

$$\text{Humedad final: } w_f = \frac{M_{T_f} - M_d}{M_d} \times 100 \quad [151.3]$$

Donde: w_0 : Humedad o contenido inicial de agua, % (aproximación de 0.01);

w_f : Humedad o contenido inicial de agua, % (aproximación de 0.01);

M_d : Masa seca del espécimen, g;

M_{T0} : Masa total del espécimen antes del ensayo, g.

11.2.3 Se calcula la densidad seca inicial del espécimen:

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_0} \quad [151.4]$$

Donde: ρ_d : Densidad seca del espécimen, g/cm³ (aproximada a 0.001);

V_0 : Volumen inicial del espécimen, cm³ (aproximación 0.01).

11.2.4 Se calcula el volumen de sólidos:

$$V_s = \frac{M_d}{G\rho_w} \quad [151.5]$$

Donde: V_s : Volumen de sólidos, cm³ (aproximado a 0.01);

G : Gravedad específica de sólidos (aproximada a 0.001);

ρ_w : Densidad del agua de poros (aproximada a 0.0001), g/cm³.

Nota 18: La densidad del agua depende de la concentración de sal y de la temperatura. Los valores apropiados se deben extraer de tablas estándar.

11.2.5 Debido a que la sección transversal de la muestra es constante a través del ensayo, es conveniente introducir el término “altura equivalente de sólidos”, definido así:

$$H_s = \frac{V_s}{A} \quad [151.6]$$

Donde: H_s : Altura de sólidos, cm (aproximada a 0.001);

A : Área del espécimen, cm².

11.2.6 Se calculan la relación de vacíos inicial y la relación de vacíos final, como sigue:

$$\text{Relación de vacíos inicial: } e_0 = \frac{H_0 - H_s}{H_s} \quad [151.7]$$

$$\text{Relación de vacíos final: } e_f = \frac{H_f - H_s}{H_s} \quad [151.8]$$

Donde: e_0 : Relación de vacíos inicial (aproximada a 0.01); e_f :

Relación de vacíos final (aproximada a 0.01); H_0 :

Altura inicial del espécimen, cm;

H_f : Altura final del espécimen, cm.

11.2.7 Se calculan el grado inicial y el grado final de saturación, en porcentaje, así:

$$\text{Grado de saturación inicial: } S_0 = \frac{M_{T_0} - M_d}{A \rho_w (H_0 - H_s)} \times 100 \quad [151.9]$$

$$\text{Grado de saturación final: } S_f = \frac{M_{T_f} - M_d}{A \rho_w (H_f - H_s)} \times 100 \quad [151.10]$$

Donde: S_0 : Grado inicial de saturación, % (aproximación 0.1); S_f :

Grado final de saturación, % (aproximación 0.1).

11.3 Cálculo de deformaciones:

11.3.1 Para cada lectura de deformación, se calcula el cambio de altura del espécimen, en cm, como sigue:

$$\Delta H = d - d_0 - d_a \quad [151.11]$$

Donde: ΔH : Cambio en la altura del espécimen, cm (aproximado a 0.00025);

- d: Lectura de deformación a varios tiempos en el ensayo, cm (aproximada a 0.00025);
- d₀: Lectura de deformación inicial, cm (aproximada a 0.00025);
- d_a: Corrección por la deformación del aparato, cm (aproximada a 0.00025).

Nota 19: Remitirse a 7.1 para la corrección por compresibilidad del aparato.

11.3.2 Se representa cada medida de deformación en, al menos, una de las siguientes maneras:

11.3.2.1 El cambio de altura del espécimen, calculado de acuerdo con 11.3.1.

11.3.2.2 Se calcula la altura del espécimen, en cm, así:

$$H = H_0 - \Delta H \quad [151.12]$$

11.3.2.3 Se calcula la relación de vacíos como sigue:

$$e = \frac{H - H_s}{H_c} \quad [151.13]$$

11.3.2.4 Se calcula la deformación unitaria axial, en porcentaje, así:

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad [151.14]$$

11.3.2.5 Se calcula el diferencial final de altura con la expresión:

$$H_d = H_f - H_{et} \quad [151.15]$$

Donde: H_d : Diferencial final de altura, cm
(aproximada a 0.001);

H_f : Altura final calculada usando d_{et} , cm (aproximada a 0.001);

H_{et} : Altura final medida, cm (aproximada a 0.001).

11.4 Se calcula el esfuerzo axial total, kPa:

$$\sigma_a = \frac{P + M_a g}{A} \times 10 \quad [151.16]$$

Donde: σ_a : Esfuerzo axial total, kPa (aproximado a la unidad);

P : Fuerza aplicada, N (aproximada a la unidad);

M_a : Masa del aparato que descansa sobre el espécimen, kg (aproximada a 0.01);

A : Área del espécimen, cm^2 (aproximada a 0.01);

g : Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s^2 .

11.5 *Propiedades tiempo-deformación* – A partir de aquellos incrementos de carga en los cuales se hizo lectura de tiempo-deformación, se generan dos alternativas (Ver numerales 11.5.1 y 11.5.2) para presentar los datos, determinar el final de la consolidación primaria y calcular la velocidad de consolidación. Se pueden usar otras técnicas de común acuerdo con el cliente con estos métodos de ensayo. Las lecturas de deformación se pueden presentar como deformación medida, altura del espécimen, o deformación unitaria axial (Ver numeral 11.6). El siguiente texto y las siguientes figuras se presentan en términos de la deformación unitaria axial. Las letras en negrilla y entre paréntesis están asociadas a las gráficas.

11.5.1 *Procedimiento 1 de interpretación* – Se dibuja la deformación unitaria axial, ϵ , contra el logaritmo del tiempo, usualmente en minutos, para cada incremento de carga aplicado (ver Figura 151 - 1).

11.5.1.1 Se traza una línea recta a través de los puntos que representan las últimas lecturas de tiempo y cuya tendencia es de línea

recta y pendiente constante (C). Se dibuja una segunda línea recta, tangente a la parte más inclinada de la

curva logaritmo del tiempo versus deformación unitaria axial (**D**). La intersección de estas dos líneas representa la deformación unitaria axial (**E**), ϵ_{100} , y el tiempo (**F**), t_{100} , correspondientes al 100 % de la consolidación primaria. El exceso de compresión por encima del 100 % de la consolidación primaria se conoce como compresión secundaria.

11.5.1.2 Se encuentra la deformación unitaria axial que representa 0 % de la consolidación primaria (**K**), seleccionando cualesquier dos puntos que tengan una relación de tiempos de 1 a 4 (**puntos G y H en este ejemplo**). El incremento de deformación unitaria axial para el mayor de los tiempos estará entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ del total del incremento de deformación unitaria axial total para el incremento de carga en cuestión. La deformación unitaria axial correspondiente a 0 % de consolidación primaria es igual a la deformación unitaria axial correspondiente al tiempo menor, menos la diferencia en deformación unitaria axial (**I=J**) entre los dos puntos seleccionados.

11.5.1.3 La deformación unitaria axial (**L**), ϵ_{50} , correspondiente al 50 % de la consolidación primaria, es igual al promedio de las deformaciones axiales unitarias correspondientes al 0 y al 100 %. El tiempo (**M**), t_{50} , requerido para el 50 % de la consolidación, se puede hallar gráficamente a partir de la curva logaritmo del tiempo - deformación, observando el tiempo al cual corresponde el 50 % de la consolidación primaria sobre ella.

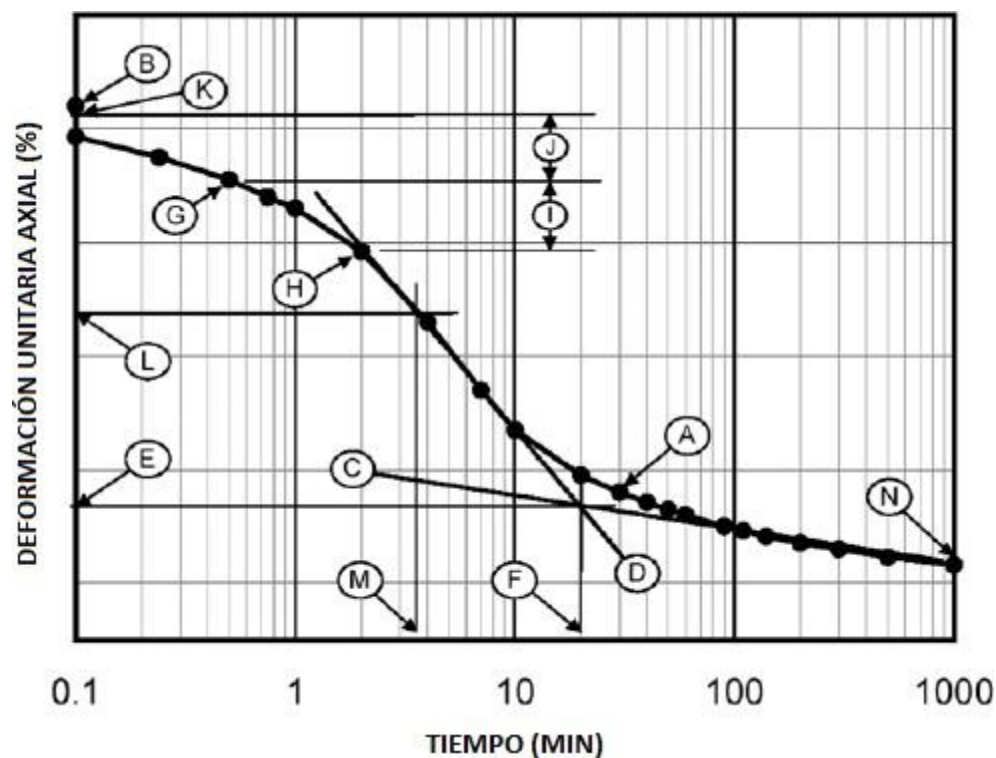
11.5.2 Procedimiento 2 de interpretación – Se dibuja la curva deformación unitaria axial, ϵ , contra la raíz cuadrada del tiempo, típicamente en minutos, para cada intervalo aplicable de carga (Ver Figura 151 - 2).

11.5.2.1 Se dibuja una línea recta a través de los puntos que representan las lecturas iniciales de tiempo y que exhiben una tendencia de línea recta (**A**). Se extrapola la línea hacia $t = 0$ y se obtiene la deformación unitaria axial que representa el 0 % de la consolidación primaria (**B**).

11.5.2.2 Se traza una segunda línea recta a través de la ordenada 0 %, de tal manera que la abscisa correspondiente (**C**) sea 1.15

veces la abscisa de la primera línea recta para todos los datos; es decir, se construye una línea recta que parta de (**B**) y que tenga una pendiente de 1.15 veces la pendiente de la línea **A**. La intersección de esta segunda línea con la curva (Ver numeral 11.5.2) define la deformación unitaria axial, ϵ_{90} , (**D**), y el tiempo t_{90} , (**E**), correspondientes al 90 % de la consolidación primaria.

11.5.2.3 La deformación unitaria axial al 100 % de la consolidación (**F**) es 1/9 mayor que la diferencia en deformación unitaria axial entre 0 y 90 % de consolidación. El tiempo de consolidación primaria (**G**), t_{100} , se puede tomar en la intersección de la curva deformación unitaria axial-raíz cuadrada del tiempo y esta ordenada de deformación axial. La deformación unitaria axial (**H**), ϵ_{50} , correspondiente al 50 % de consolidación, es igual a la deformación unitaria axial a los 5/9 de la diferencia entre 0 y 90 % de consolidación. El tiempo para el 50% de consolidación (**I**), t_{50} , corresponde a la intersección de curva deformación unitaria axial-raíz cuadrada del tiempo con la ordenada de deformación 50 %.



A – CURVA ESFUERZO –DEFORMACIÓN UNITARIA TRAZADA SOBRE LOS PUNTOS DEL ENSAYO

B - DEFORMACIÓN A TIEMPO = 0 MINUTOS

C - AJUSTE LINEAL DE LA PORCIÓN FINAL DE LA CURVA

D - AJUSTE LINEAL DE LA PORCIÓN MÁS INCLINADA DE LA CURVA

E - LECTURA DE DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA INTERSECCIÓN DE LAS LÍNEAS C Y D, CORRESPONDIENTE AL 100 % DE CONSOLIDACIÓN

F - LECTURA DE TIEMPO EN LA INTERSECCIÓN DE LAS LÍNEAS C Y D, CORRESPONDIENTE AL 100 % DE CONSOLIDACIÓN

G - PRIMER PUNTO SELECCIONADO PARA LA INTERPRETACIÓN DEL 0 % DE LA CONSOLIDACIÓN

H - SEGUNDO PUNTO PARA LA INTERPRETACIÓN, CORRESPONDIENTE A UN TIEMPO CUATRO VECES MÁS QUE EL DEL PUNTO G

I - INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA ENTRE LOS PUNTOS H Y G

J - INCREMENTO DE DEFORMACIÓN UNITARIA IGUAL A I

K - DEFORMACIÓN DEDUCIDA PARA EL COMIENZO DE LA CONSOLIDACIÓN

L - DEFORMACIÓN AL 50 % DE LA CONSOLIDACIÓN, IGUAL A LA MEDIA ENTRE K Y E

M - TIEMPO CORRESPONDIENTE AL 50 % DE LA CONSOLIDACIÓN

N - DEFORMACIÓN UNITARIA Y TIEMPO PARA LA ÚLTIMA LECTURA DEL INCREMENTO

Nota: Esquema sin escala

Figura 151 - 1. Curva tiempo-deformación usando el método del logaritmo del tiempo

11.5.3 Se calcula el coeficiente de consolidación para cada incremento de carga, usando la siguiente ecuación y los valores apropiados de acuerdo con el método de interpretación escogido:

$$c_v = \frac{T H_{D50}^2}{t} \quad [151.17]$$

Donde: c_v : Coeficiente de consolidación, cm^2/s (3 dígitos significativos);

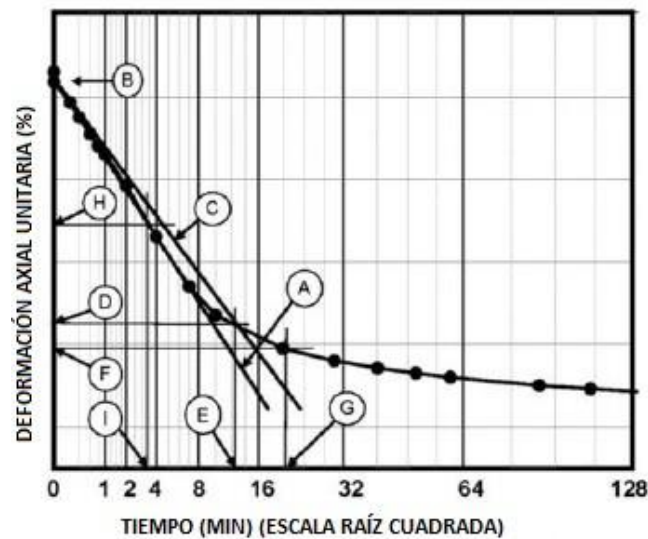
T: Un factor adimensional de tiempo: para el procedimiento descrito en el numeral 11.5.1, se usa 50

% de consolidación, con $T = T_{50} = 0.197$; para el procedimiento descrito en el numeral 11.5.2, se usa 90

% de consolidación con $T = T_{90} = 0.848$;

t: Tiempo correspondiente al grado específico de consolidación, s; para el procedimiento descrito en el numeral 11.5.1, se usa $t = t_{50}$; para el procedimiento descrito en el numeral 11.5.2 se usa $t = t_{90}$;

H_{D50} : Longitud de la trayectoria de drenaje al 50 % de consolidación, cm; para drenaje por las dos caras, H_{D50} es la mitad de la altura del espécimen al incremento apropiado; para drenaje por una sola cara, H_{D50} es la altura completa.



A – AJUSTE LINEAL DE LOS PRIMEROS DATOS TOMADOS

B - EXTENSIÓN DE LA LÍNEA "A" AL TIEMPO = 0 MINUTOS

C - LÍNEA CONSTRUIDA CON UNA PENDIENTE DE 1.15 VECES LA DE LA LÍNEA A

D - DEFORMACIÓN LEÍDA EN LA INTERSECCIÓN DE LA LÍNEA C CON LA CURVA TRAZADA SOBRE LOS DATOS

E - TIEMPO LEÍDO EN LA INTERSECCIÓN DE LA LÍNEA C CON LA CURVA TRAZADA SOBRE LOS DATOS

F - DEFORMACIÓN CORRESPONDIENTE AL 100 % DE CONSOLIDACIÓN

G - TIEMPO CORRESPONDIENTE AL 100 % DE CONSOLIDACIÓN

H - DEFORMACIÓN UNITARIA CORRESPONDIENTE AL 50% DE CONSOLIDACIÓN

I - TIEMPO CORRESPONDIENTE AL 50 % DE CONSOLIDACIÓN

Nota: Esquema sin escala

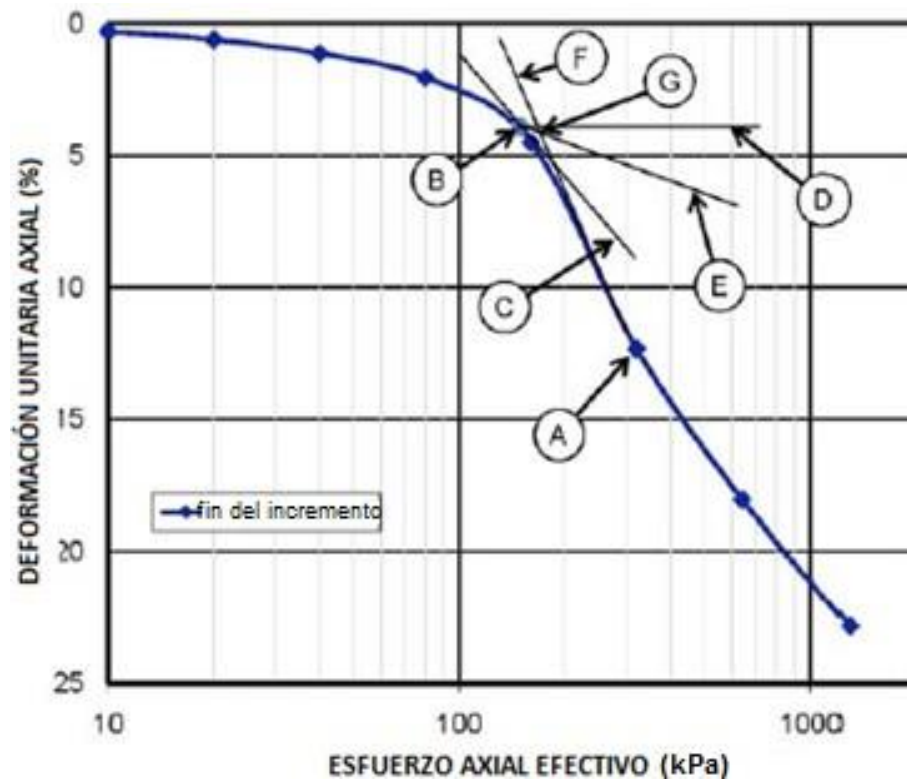
Figura 151 - 2. Curva tiempo–deformación usando el método de la raíz cuadrada del tiempo

11.6 Propiedades carga–deformación:

11.6.1 Se tabulan las lecturas de deformación o de cambio de deformación, d_f , correspondientes al final de cada incremento y, si está usando el método de ensayo B, los correspondientes al final de la consolidación primaria, d_{100} .

11.6.2 Se dibujan los resultados de deformación correspondientes al final de cada incremento (en la Figura 151 - 3 están en términos de deformación unitaria axial) y, si está usando el método B, los correspondientes al final de la consolidación primaria versus el esfuerzo en escala logarítmica.

Nota 20: En algunos casos, es preferible presentar la curva carga-deformación en escala aritmética.



A - DEFORMACIÓN TRAZADA SOBRE LOS PUNTOS TOMADOS

B - PUNTO DE MÁXIMA CURVATURA

C - LÍNEA TANGENTE A LA CURVA EN EL PUNTO B

D - LÍNEA HORIZONTAL A TRAVÉS DEL PUNTO B

E - LÍNEA BISECTRIZ DEL ÁNGULO FORMADO POR C Y D

F - LÍNEA TANGENTE A LA PORCIÓN MÁS INCLINADA DE LA CURVA

G - ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN, LEÍDO EN LA INTERSECCIÓN DE LAS LÍNEAS E Y F

Figura 151 - 3. Evaluación del esfuerzo de pre-consolidación por el método de Casagrande

11.6.3 Con referencia a la Figura 151 - 3, se determina el valor del esfuerzo de pre-consolidación usando el procedimiento que se describe a continuación:

Nota 21: Se puede emplear otro método reconocido para estimar el esfuerzo de pre-consolidación, pero identificándolo claramente en el informe.

11.6.3.1 Se traza una curva suave a través de los puntos.

11.6.3.2 Se estima el punto de máxima curvatura sobre la curva de

compresión (**B**).

11.6.3.3 Se dibuja la tangente a la curva de compresión en este punto (**C**), y se traza una línea horizontal (**D**) partiendo también del

punto (B). Se prolongan las líneas C y D hacia la derecha (en el sentido creciente de las abscisas).

11.6.3.4 Se traza una línea (E), que bisecte el ángulo formado entre las dos líneas C y D.

11.6.3.5 Se dibuja una línea recta tangente a la porción lineal más inclinada de la curva de compresión (brazo de compresión virgen) (F), y se prolonga hacia arriba hasta que se corte con la línea bisectriz (E). El punto de corte se llamará (G). La abscisa correspondiente a este punto de intersección será el esfuerzo estimado de pre-consolidación.

11.6.4 La evaluación completa incluye, a menudo, la consideración de información que no está al alcance del laboratorio que realiza el ensayo de consolidación. Por esta razón, cualquier evaluación adicional que se presente solo tiene carácter informativo.

12 INFORME

12.1 Debe incluir, cuando menos, la siguiente información:

12.1.1 Nombre del proyecto, localización, número de la perforación, número de la muestra y profundidad.

12.1.2 Número del ensayo, datos de inicio, aparatos y técnico encargado del ensayo.

12.1.3 Descripción y clasificación del suelo de acuerdo con las normas INV E-102 e INV E-181, cuando se dispone de los límites de Atterberg. Se deben incluir, si están disponibles, los resultados de los ensayos de gravedad específica, límites de Atterberg y distribución granulométrica de la muestra, así como la fuente de esta información si es otra diferente de la obtenida sobre el espécimen de ensayo. Se debe anotar, también, el tamaño de las partículas aisladas de gran tamaño halladas en el espécimen.

12.1.4 *Condición del suelo:*

12.1.4.1 Contenido de humedad promedio de los recortes producto del tallado de la muestra, si está disponible.

12.1.4.2 Contenidos de humedad inicial y final del espécimen.

12.1.4.3 Densidad seca inicial del espécimen.

12.1.4.4 Relaciones de vacíos inicial y final del espécimen.

12.1.4.5 Grados de saturación inicial y final del espécimen.

12.1.4.6 Diferencia final de altura.

12.1.4.7 Esfuerzo estimado de pre-consolidación.

12.1.5 *Procedimiento de ensayo:*

12.1.5.1 Procedimiento de labrado para la preparación del espécimen; especificar si la probeta fue recortada con una plataforma giratoria, usando una zapata de corte o ensayado directamente en un anillo a partir del anillo del tomamuestras.

12.1.5.2 Condición del ensayo (a humedad natural o inundado, esfuerzo medido en la inundación, agua de ensayo).

12.1.5.3 Método de ensayo (A o B).

12.1.5.4 Procedimiento de interpretación (1 o 2, o ambos) empleado para encontrar el coeficiente de consolidación.

12.1.5.5 Lista de los incrementos de carga y su duración, si fue diferente de 24 horas; resultados deformación final para cada incremento y, para el método B, resultados de la deformación primaria final y coeficiente de consolidación (Ver Tabla 151 - 1).

12.1.5.6 Todas las desviaciones con respecto al procedimiento establecido, incluyendo las secuencias de carga especiales.

12.1.6 *Representaciones gráficas:*

12.1.6.1 Gráficas de deformación unitaria axial contra el logaritmo del tiempo (Figura 151 - 1) o raíz cuadrada del tiempo (Figura 151

- 2), para aquellos incrementos de carga en los que se tomaron lecturas.

12.1.6.2 Curva de “relación de vacíos versus esfuerzo axial” (en escala logarítmica) o curva de “porcentaje de compresión versus esfuerzo axial” (en escala logarítmica). Ver Figura 151 - 3.

12.1.6.3 En los casos en los cuales se toman lecturas de la tasa de deformación en el tiempo para varios incrementos de carga, se debe preparar una gráfica de logaritmo de coeficiente de consolidación versus la relación de vacíos promedio o el porcentaje promedio de compresión para los respectivos incrementos de carga (Figura 151 - 4). Se puede anexar, de manera alternativa, una gráfica del coeficiente de consolidación o de su logaritmo versus el logaritmo del esfuerzo promedio axial. Si las lecturas de tiempo se obtuvieron solo para dos incrementos, simplemente se tabula el valor de c_v contra el esfuerzo promedio axial para el incremento.

Nota 22: Se escoge el esfuerzo promedio entre dos incrementos de carga, por cuanto representa una coordenada conveniente para dibujar el resultado. A menos que se mida la velocidad de disipación de la presión de poros, no es posible determinar el esfuerzo efectivo real al momento del 50 % de la consolidación. Además, se puede generar ambigüedad en los casos en los cuales el ensayo ha incluido uno o más ciclos intermedios de rebote.

13 PRECISIÓN Y SESGO

13.1 *Precisión* – Debido a la naturaleza de los materiales de suelo empleados para este ensayo, no es factible, o resulta demasiado costoso, producir simultáneamente múltiples especímenes con propiedades físicas uniformes. Cualquier variación que se observe en los datos se puede deber a variación del espécimen o en los procedimientos del operario o del laboratorio.

13.2 *Sesgo* – No hay valores de referencia aceptables para este método de ensayo, de allí que no se puede determinar el sesgo.

14 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 2435M – 11.

Tabla 151 - 1. Ejemplo de un resumen del ensayo de consolidación

Incremento de carga	Esfuerzo axial σ_a (kPa)	Deformación corregida ΔH (mm)	Altura de la muestra H (mm)	Deformación Unitaria axial ϵ_a (%)	Relación de vacíos e	Deformación corregida ΔH_{LD} (mm)	Altura de la muestra H_{LD} (mm)	Deformación unitaria axial $\epsilon_{a,LD}$ (%)	Relación de vacíos e_{LD}	Tiempo t_{50} (seg)	Coeficiente de consolidación C_v (mm ² /seg)	Tiempo t_{50} (seg)	Coeficiente de consolidación C_v (mm ² /seg)
Asiento	soating	0.0000	19.0500	0.00	1.231								
1	5	0.0288	19.0212	0.15	1.228								
2	10	0.0557	18.9943	0.29	1.225								
3	20	0.1133	18.9367	0.59	1.218								
4	40	0.2139	18.8361	1.12	1.206								
5	80	0.3867	18.6633	2.03	1.186	0.2696	18.7804	1.42	1.200	52	3.34E-01	10	3.34E-01
6	160	0.8560	18.1940	4.49	1.131	0.5355	18.5145	2.81	1.169	144	1.17E-01	30	1.17E-01
7	320	2.3496	16.7004	12.33	0.956	1.5439	17.5061	8.10	1.050	516	2.93E-02	102	2.93E-02
8	640	3.4392	15.6108	18.05	0.828	2.8317	16.2183	14.86	0.900	282	4.59E-02	53	4.59E-02
9	1280	4.3440	14.7060	22.80	0.722	3.8223	15.2277	20.06	0.784	156	7.32E-02	31	7.32E-02
10	320	4.2553	14.7947	22.34	0.733								
11	80	3.9300	15.1200	20.63	0.771								
12	20	3.5131	15.5369	18.44	0.820								
13	5	3.0981	15.9519	16.26	0.868								

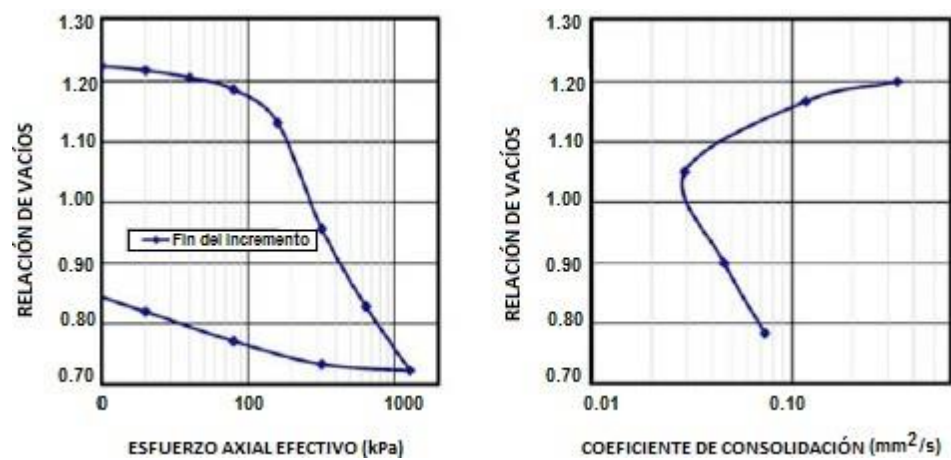


Figura 151 - 4. Ejemplo de gráficas realizadas a partir del ensayo de consolidación