

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

GUÍA DE LABORATORIO PARA ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS

CONTENIDO

1. RESUMEN.....	3
2. MARCO TEÓRICO	3
3. OBJETIVO	5
3.1.....	5
3.2.....	5
4. PRECAUCIONES.....	5
4.1.....	5
4.2.....	5
5. MÉTODOS	5
5.1. Método A	5
5.2. Método B	6
6. EQUIPO.....	6
7. CALIBRACIÓN	11
8. MUESTRA DE ENSAYO	11
9. DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES INDICE DEL SUELO	13
10. PROCEDIMIENTO	13
11. CALCULOS	16
11.1. Propiedades físicas de la muestra:	16
11.1.1. Masa seca de la muestra:	16
11.1.2. Contenidos de humedad inicial y final del espécimen, en porcentaje:	16
11.1.3. Densidad seca inicial del espécimen:	16
11.1.4. Volumen de solidos:	17
11.1.5. Altura equivalente de solidos:	17
11.1.6. Relación de vacíos inicial y la relación de vacíos final:.....	17
11.1.7. Grado inicial y grado final de saturación, en porcentaje	17
11.2. Cálculo de deformaciones:	18
11.2.1. Cambio de altura del espécimen:.....	18
11.2.2. Representación de cada medida de deformación en al menos una de las siguientes maneras: 18	
11.2.2.1. Cambio de altura del espécimen, de acuerdo al numeral 11.2.1.	18
11.2.2.2. Cálculo de relación de vacíos:	18
11.2.2.3. Cálculo de la deformación unitaria axial, en porcentaje:.....	18

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

11.2.2.4.	Calculo del diferencial final de altura:.....	19
11.3.	Calculo del esfuerzo axial total, kPa:	19
11.4.	Propiedades tiempo-deformación:	19
11.4.1.	Procedimiento 1 de interpretación:.....	19
11.4.2.	Procedimiento 2 de interpretación.....	20
11.5.	Coeficiente de consolidación para cada incremento de carga, teniendo en cuenta el método de interpretación escogido.	22
11.6.	Propiedades carga-deformación:	23
12.	RECOMENDACIONES	24
13.	REFERENCIAS	24

IMÁGENES E ILUSTRACIONES

Imagen 1.	Dispositivo de carga. Fuente: Propia.	6
Imagen 2.	Consolidómetro. Fuente: Propia.	7
Imagen 3.	Discos porosos. Fuente: Universidad de Alicante.	8
Imagen 4.	Pantalla filtrante. Fuente: Universidad de Alicante.	9
Imagen 5.	Cizalla. Fuente: Universidad de Alicante.	9
Imagen 6.	Balanza de 1.0 kg. Fuente: Propia.	10
Imagen 7.	Horno para secado de muestras. Fuente: Propia.	10
Ilustración 1.	Curva tiempo-deformación usando el método del logaritmo del tiempo. Fuente: INV E 151-13.	21
Ilustración 2.	Curva tiempo-deformación usando el método la raíz cuadrada del tiempo. Fuente: INV E 151-13.	22
Ilustración 3.	Curva tiempo-deformación usando el método de la raíz cuadrada del tiempo.	23

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

1. RESUMEN

Esta guía resume el procedimiento para realizar el ensayo de consolidación unidimensional de los suelos, el cual sirve para determinar la magnitud y la velocidad de consolidación de muestras de suelos mediante en donde se permite el drenaje axial de especímenes confinados lateralmente, mientras se someten a incrementos de carga con esfuerzo controlado. Este ensayo se efectúa generalmente en muestras de suelos finos saturadas e inalteradas, naturalmente sedimentados en agua, aunque el procedimiento básico también es aplicable a muestras de suelos compactados y a muestras inalteradas de suelos formados por procesos diferentes (alteración química y meteorización).

2. MARCO TEÓRICO

Los datos que se generan a partir de este ensayo se utilizan para estimar la magnitud y velocidad de los asentamientos diferenciales y totales de una estructura o de un terraplén, además son esenciales para diseñar y evaluar el comportamiento de las estructuras civiles. Este ensayo permite modelar situaciones en campo o encontrar parámetros especiales. En muestras inalteradas, este procedimiento permite estimar el esfuerzo de pre-consolidación usando técnicas establecidas.

Los métodos de ensayo usan la teoría de la consolidación basada en la ecuación de consolidación de Terzaghi para calcular el coeficiente de consolidación, CV. Por lo tanto, el análisis se basa en los siguientes supuestos:

- El suelo está saturado y tiene propiedades homogéneas.
- El flujo del agua de los poros se produce en dirección vertical.
- Se desprecia la compresibilidad de las partículas del suelo y del agua.
- La relación esfuerzo-deformación es lineal bajo el incremento de carga.
- La relación de permeabilidad – compresibilidad del suelo es constante bajo el incremento de carga.
- La ley de Darcy para flujo a través de medios porosos aplica.

Para comprender aún más este ensayo se deben de tener en cuenta los siguientes términos:

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

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.

Presión o esfuerzo estimado de pre-consolidación – Valor del esfuerzo de preconsolidación 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.

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.

Incremento de carga – Etapa del ensayo en la cual la muestra está bajo un esfuerzo axial total constante.

Duración del incremento de carga – Lapso durante el cual la muestra está bajo un esfuerzo total constante.

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.

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.

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.

Incremento de esfuerzo axial total – El cambio (incremento o disminución) en el esfuerzo axial total aplicado en una etapa.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

3. OBJETIVO

3.1.

Calcular la velocidad de consolidación de muestras de suelos con el coeficiente de consolidación.

3.2.

Generar a partir de los datos obtenidos las gráficas de deformación unitaria axial contra el logaritmo del tiempo, la curva de “relación de vacíos versus esfuerzo axial” (en escala logarítmica) o la curva de “porcentaje de compresión versus esfuerzo axial” (en escala logarítmica).

4. PRECAUCIONES

4.1.

Es importante seguir un proceso cuidadoso de selección y preparación de las muestras ya que si se genera alguna alteración sobre las mismas los resultados se verán afectados considerablemente.

4.2.

Los aparatos no poseen mecanismos para verificar la disipación de la presión de poros y tampoco cuentan con dispositivos para verificar el grado de saturación de la muestra por lo tanto es necesario para el primer caso que se interprete indirectamente si la consolidación se ha completado y en el segundo caso tener en cuenta que las muestras están saturadas.

5. MÉTODOS

Para ejecutar el ensayo se puede seguir uno de los siguientes métodos:

5.1. Método A

Se aplica de manera constante cada incremento de carga durante 24 horas o múltiplos de este tiempo. Las lecturas de tiempo – deformación se realizarán como mínimo, durante dos incrementos de carga. Este método únicamente provee la curva de compresión de la muestra y los resultados combinan las deformaciones debidas a consolidación primaria y a consolidación secundaria.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

5.2. Método B

Las lecturas de tiempo – deformación se hacen para cada uno de los incrementos de carga, estos son aplicados: después de alcanzar el 100% de la consolidación primaria o a incrementos constantes de tiempo, tal cual como en el método A. A partir de este método se obtiene 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.

6. EQUIPO

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 ± 0.5 % de la carga aplicada y debe permitir la aplicación rápida de un incremento de carga dado sin generar ningún impacto significativo.



Imagen 1. Dispositivo de carga. Fuente: Propia.

Consolidómetro – Dispositivo que mantiene 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.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

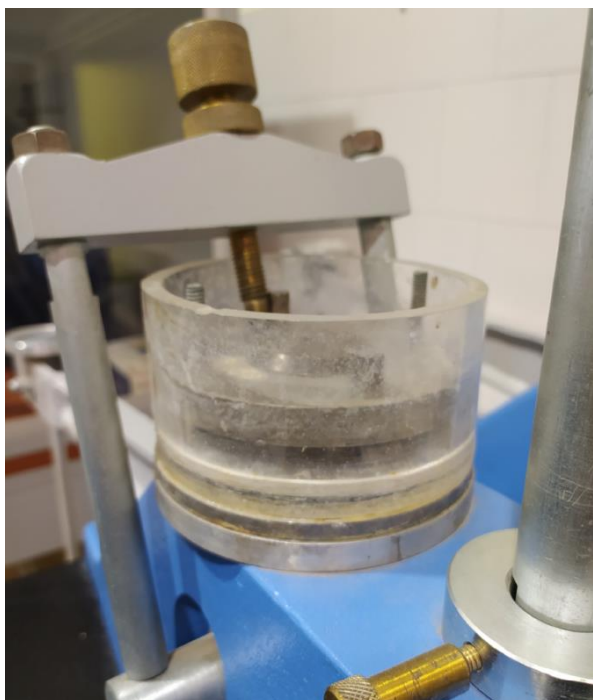


Imagen 2. Consolidómetro. Fuente: Propia.

Especificaciones para el consolidómetro

- Diámetro mínimo de la muestra – El diámetro mínimo de la muestra o el diámetro interno del anillo, debe ser de 50 mm (2.0").
- 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.
- 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.
- Rigidez del anillo – El anillo deberá ser suficientemente rígido para prevenir deformaciones laterales significativas durante el ensayo.
- 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.

Discos porosos –Podrán ser de carburo de silicio, de óxido de aluminio o de otro material de rigidez similar, que no se corroa ante el suelo o los fluidos de poros. Los

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

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.



Imagen 3. Discos porosos. Fuente: Universidad de Alicante.

Especificaciones para los discos porosos:

- **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.
- **Espesor** – El espesor del disco debe ser suficiente para evitar su rotura.
- **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. Además, Se recomienda almacenar los discos porosos en un recipiente con agua de ensayo limpia entre uno y otro ensayo.

Pantalla filtrante – Se coloca entre el disco poroso y el espécimen, con el objeto de evitar la intrusión de suelo dentro de aquél. Puede ser de nylon-monofilamento o un papel de filtro grado 54, endurecido, de bajo contenido de ceniza.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	



Imagen 4. Pantalla filtrante. Fuente: Universidad de Alicante.

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. El elemento de corte debe tener un borde afilado, una superficie altamente pulida y estar recubierto con un material de baja fricción.



Imagen 5. Cizalla. Fuente: Universidad de Alicante.

Deformímetro – Para medir el cambio de espesor de la muestra con una resolución de 0.0025 mm (0.0001") o mayor.

Placa espaciadora (disco espaciador) – 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.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

Balanza – Empleada para determinar la masa de la muestra más el anillo, etc., con al menos cuatro dígitos significativos.



Imagen 6. Balanza de 1.0 kg. Fuente: Propia.

Horno – Termostáticamente controlado, de ventilación forzada, que pueda mantener una temperatura a de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).



Imagen 7. Horno para secado de muestras. Fuente: Propia.

Recipientes para determinar la humedad – De acuerdo con la norma INV E– 122.

Ambiente –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. El aparato no debe quedar expuesto directamente a los rayos del sol.

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

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

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.

Equipo misceláneo – Incluye espátulas, navajas y sierras de alambre para preparar la probeta.

7. CALIBRACIÓN

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 disco de papel de filtro.

Para calibrar el consolidómetro se arma tomando en lugar de la muestra un disco de cobre, de aluminio o de acero aproximadamente de la misma altura que una probeta, se humedecen los discos porosos, se carga y descarga el consolidómetro y se mide la deformación para cada carga aplicada. Para cada aplicación de cara se dibujan o tabulan las deformaciones del aparato (correcciones) que serán aplicadas a las deformaciones leídas durante el ensayo con muestra.

Elementos misceláneos: Se debe determinar la masa conjunta del disco poroso superior mas el de cualquier otro dispositivo que descansa sobre la muestra y no sea contrarrestado por el bastidor (M_a).

Constantes del equipo: se deben medir anualmente.

Altura del anillo (H) y diámetro del anillo (D_r) y masa del anillo (M_r).

Espesor de la pantalla de filtro (H_{fs})

Espesor del resalto de la placa espaciadora (H_{rs})

8. MUESTRA DE ENSAYO

Para recolectar las muestras se debe seguir los procedimientos descritos en las normas INV E-105 e INV E-109 para muestras inalteradas y para cortarlas en bloque la norma INV E-104. Para su transporte se deben seguir los alineamientos para grupos C y D de

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

la norma INV E-103 (Las muestras en bloque están cubiertas por el grupo B). Por otro lado, las muestras deben almacenarse de tal forma que estas no pierdan humedad. Se resalta la importancia de no alterar en lo posible a las muestras obtenidas.

Se recorta la muestra e inserta en el anillo de consolidación donde debe quedar ajustado dentro del anillo, sin vacíos en su perímetro. En suelos fibrosos (Turba) la muestra se puede transferir directamente desde el tubo que la contiene hasta el anillo. Las muestras que se obtienen empleando un tomamuestras y de acuerdo a la norma INV E-109 se pueden usar directamente sin recorte previo.

Se recorta la muestra a ras con los extremos planos del anillo, se usa una sierra de alambre para minimizar el desmoronamiento y se puede usar una regla con borde afilado para el labrado final. En suelos duros el recorte de la parte inferior y superior se debe hacer únicamente con la regla. Si el consolidómetro no tiene la manera de centrar los discos porosos, la muestra debe ser deprimida levemente bajo la parte superior del anillo y también en el fondo con el uso del anillo flotante, lo que facilitará tener las piedras porosas en el centro. Después se debe cubrir la muestra con el filtro y se usa el disco espaciador para extrudir parcialmente la muestra desde el fondo del anillo para así recortar la superficie inferior de la muestra a ras con el anillo.

Se determina la masa húmeda inicial de la muestra húmeda inicial de la muestra (M_{T0}), midiendo primero la masa del conjunto muestra-anillo y restando la masa del anillo (M_r).

Se determina la altura inicial de la muestra (H_0) usando las siguientes técnicas:

- Se toma el promedio de al menos cuatro alturas medidas en diferentes puntos mediante el uso del calibrador y de ser necesario descontar el espesor del filtro.
- 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}).

Se calcula el volumen inicial de la muestra (V_0) a partir del diámetro del anillo y la altura inicial de la muestra.

Si quedó material disponible se recomienda calcular al menos dos contenidos de humedad natural de acuerdo con la norma INV E-122.

El material sobrante se puede guardar en recipiente para determinar las propiedades índice del suelo.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

9. DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES INDICE DEL SUELO

La determinación de estas propiedades no forma parte de este ensayo sin embargo cuando se requieren se deben hacer con el material más representativo posible. e

Gravedad específica: Se debe determinar de acuerdo con la norma INV E-128.

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.

Granulometría: Su determinación se realiza aplicando la norma INV E-123 (excepto que se debe obviar el requisito sobre el tamaño mínimo de la muestra).

10. PROCEDIMIENTO

Según el material a ensayar se preparan los discos porosos y de otros elementos. El consolidómetro se ensambla evitando un cambio en el contenido de humedad o expansión de la muestra. Para suelos secos altamente expansivos se usan discos porosos seco y filtros, para suelos parcialmente saturados los discos deben estar humedecidos, los discos saturados se utilizan solamente cuando la muestra está saturada y presenta una baja afinidad por el agua.

Se ensamblan en el consolidómetro el anillo con la muestra, los discos porosos y los filtros. Si no se inunda la probeta después de la aplicación de la carga el consolidómetro se debe encerrar en una membrana de caucho para prevenir el cambio de volumen debido a la evaporación.

Se coloca el consolidómetro en el aparato de carga y se aplica una carga inicial que genere un esfuerzo axial total de alrededor de 5kPa seguido de esto se ajusta el deformímetro y se registra la deformación inicial (d_0). Si es necesario se incrementa la carga para evitar la expansión o si con 5kPa son suficientes se deberá disminuir a 3Kpa o menos la carga inicial.

Si la muestra ensayada fue tomada por debajo del nivel freático o saturada en condiciones de campo, se deberá inundar con agua después de la aplicación de la carga inicial e incrementar la carga rápidamente para evitar su expansión. Se registra la carga aplicada que se necesita para evitar la expansión y la lectura de la deformación

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

resultante. En caso de que la muestra se inunde para simular condiciones especiales esta deberá ejecutarse con un esfuerzo axial total de tal forma que prevenga la expansión

Ahora la muestra se someterá a incrementos de esfuerzo axial total constante. El programa de carga depende del objetivo del ensayo y debe cumplir las siguientes pautas:

- El programa estándar debe incluir la relación de incremento de carga de 1.0, lo que logra duplicando el esfuerzo axial total aplicado para obtener valores alrededor de 12, 25, 50, 100, 200, etc, kPa.
- Cuando se requiere 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 puntos que definan una línea recta cuando se dibujen los esfuerzos en una escala logarítmica, tres puntos que definan una curva cóncava cuando se dibujen los esfuerzos en una escala logarítmica o un nivel de esfuerzos que sea 8 veces el esfuerzo estimado de pre-consolidación.
- El plan de descarga o rebote se debe elegir de manera que se divida aproximadamente por dos el esfuerzo anterior aplicado a la muestra, sin embargo, se aplican también cargas que representen una cuarta parte de la anterior.
- Cuando se trata de arcillas sobreconsolidadas, se pueden obtener los parámetros de recompresión de mejor forma aplicando un ciclo de carga y descarga una vez se ha sobrepasado el esfuerzo de preconsolidación.
- Se puede emplear programas alternativos de carga y descarga o recarga que permitan una mejor definición de alguna parte de la curva de compresión.

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 esta.

Método A

El incremento de carga es en un tiempo estándar de 24 horas, se debe anotar la deformación axial d durante al menos dos incrementos de carga, y al menos uno

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

después de exceder el esfuerzo de preconsolidación. 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, una vez se haya aplicado la carga. Para verificar que se ha terminado la consolidación primaria se toman suficientes lecturas al final de la duración de cada incremento. En algunos suelos es necesario incrementar el periodo de carga mayor a 24 horas para completar la consolidación primaria.

Método B

Se anota para cada incremento la deformación axial d a intervalos de tiempo de aproximadamente: 1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos y 1, 2, 4, 8 y 24 horas 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. Para cualquier incremento de carga donde no sea posible verificar el fin de la consolidación la duración del incremento de carga debe ser constante y debe superar el tiempo requerido para conseguir la consolidación primaria. Cuando se necesite evaluar la compresión secundaria, se aumenta la duración del incremento de carga lo suficiente para definir su velocidad.

Para evitar el hinchamiento durante el desmante se lleva la muestra hasta la carga inicial. Se remueven del consolidómetro la muestra y el anillo y se seca cualquier agua presente en ellos. Cuando el cambio de la deformación axial se ha reducido a menos de 0.2% por hora se anota la deformación axial final del ensayo d_{et} y se remueve rápidamente el consolidómetro del marco de carga.

Se mide la altura del espécimen H_{et} tomando el promedio de al menos 4 medidas en diferentes puntos uniformemente espaciados en la parte inferior y superior del espécimen.

Se determina la masa total de la probeta M_T midiendo primero el conjunto anillo-muestra y restando después la masa del anillo.

La manera mas 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 la norma INV E-122.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 SIGUD
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

11. CÁLCULOS

Los cálculos mostrados emplean el sistema internacional de medidas. En cada ecuación se emplea la unidad más conveniente para cada variable.

11.1. Propiedades físicas de la muestra:

11.1.1. Masa seca de la muestra:

$$M_d = \frac{M_{Tf}}{1 + W_{fp}}$$

M_d = Masa seca del espécimen total, g.

M_{Tf} = Masa total del espécimen después del ensayo, g.

M_{fp} = Contenido de agua de la cuña de espécimen tomada después del ensayo, en forma decimal.

11.1.2. Contenidos de humedad inicial y final del espécimen, en porcentaje:

$$\text{Humedad inicial: } w_0 = \frac{M_{T0} - M_d}{M_d} \times 100$$

$$\text{Humedad final: } w_f = \frac{M_{Tf} - M_d}{M_d} \times 100$$

Donde:

w_0 = Humedad o contenido inicial de agua, %.

w_f = Humedad o contenido inicial de agua, %.

M_d = Masa seca del espécimen, g.

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

11.1.3. Densidad seca inicial del espécimen:

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_0}$$

Donde:

ρ_d = Densidad seca del espécimen, g/cm³.

V_0 = Volumen inicial del espécimen, cm³.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 Sistema Integrado de Gestión
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

11.1.4. Volumen de sólidos:

$$V_s = \frac{M_d}{G\rho_w}$$

Donde:

V_s = Volumen de sólidos, cm³.

G = Gravedad específica de sólidos.

ρ_w = Densidad del agua de poros, g/cm³.

11.1.5. Altura equivalente de sólidos:

Ya que la sección transversal de la muestra es constante a través del ensayo.

$$H_s = \frac{V_s}{A}$$

Donde:

H_s = Altura de sólidos, cm.

A = Área del espécimen, cm².

11.1.6. Relación de vacíos inicial y la relación de vacíos final:

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

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

Donde

e_0 = Relación de vacíos inicial.

e_f = Relación de vacíos final.

H_0 = Altura inicial del espécimen, cm.

H_f = Altura final del espécimen, cm.

11.1.7. Grado inicial y grado final de saturación, en porcentaje

$$\text{Grado de saturación inicial: } S_0 = \frac{(M_{T0} - M_d)}{A\rho_w (H_0 - H_s)} \times 100$$

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 SIGUD Sistema Integrado de Gestión
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

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

Donde:

S_0 = Grado inicial de saturación, %.

S_f = Grado final de saturación, %.

11.2. Cálculo de deformaciones:

11.2.1. Cambio de altura del espécimen:

Para cada lectura de deformación

$$\Delta H = d - d_0 - d_a$$

Donde:

ΔH = Cambio en altura del espécimen, cm.

d = Lectura de deformación a varios tiempos en el ensayo, cm.

d_0 = Lectura de deformación inicial, cm.

d_a = Corrección por la deformación del aparato, cm.

11.2.2. Representación de cada medida de deformación en al menos una de las siguientes maneras:

11.2.2.1. Cambio de altura del espécimen, de acuerdo al numeral 11.2.1.

11.2.2.2. Cálculo de relación de vacíos:

$$e = \frac{H - H_s}{H_s}$$

11.2.2.3. Cálculo de la deformación unitaria axial, en porcentaje:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100$$

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

11.2.2.4. Cálculo del diferencial final de altura:

$$H_d = H_f - H_{et}$$

Donde:

H_d = Diferencial final de altura, cm.

H_f = Altura final calculada usando d_{et} , cm.

H_{et} = Altura final medida, cm.

11.3. Cálculo del esfuerzo axial total, kPa:

$$\sigma_a = \left(\frac{P + M_a g}{A} \right) * 10$$

Donde:

σ_a = Esfuerzo axial total, kPa.

P = Fuerza aplicada, N.

M_a = Masa del aparato que descansa sobre el espécimen, kg.

A = Área del espécimen, cm².

g = Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

11.4. Propiedades tiempo-deformación:

A partir de los incrementos de cara en los cuales se hizo lectura de tiempo – deformación, se generan dos alternativas para presentar los datos, determinar el final de la consolidación primaria y calcular la velocidad de consolidación.

11.4.1. 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.

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

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

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.

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.

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.

11.4.2. Procedimiento 2 de interpretación.

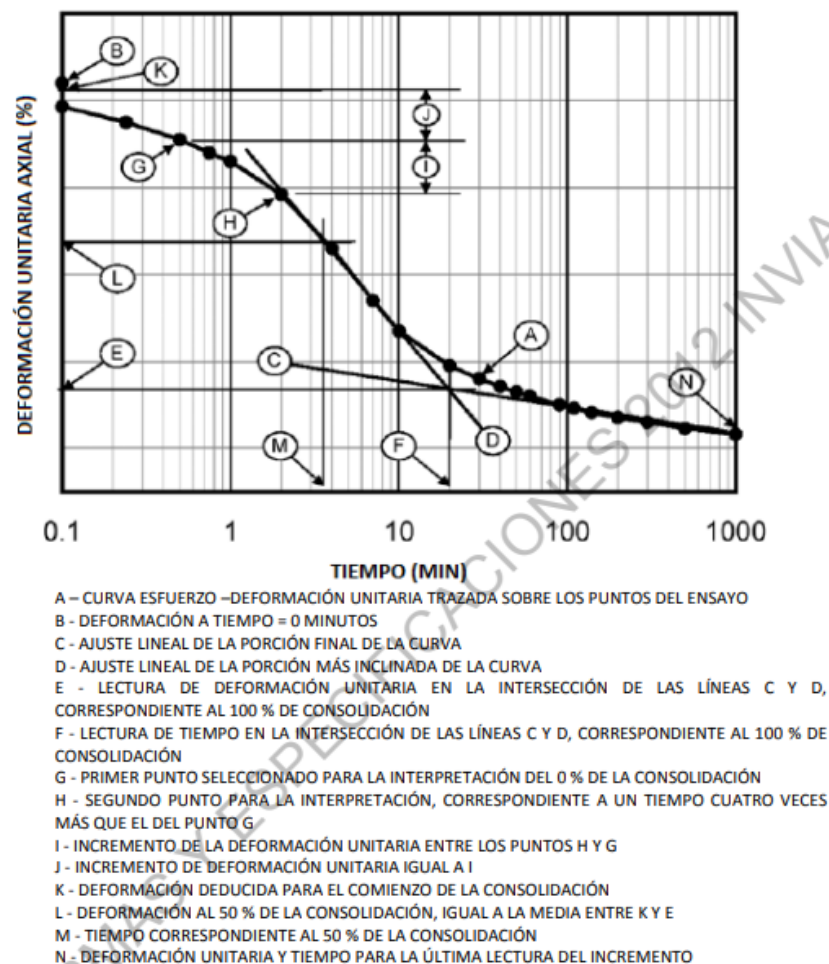
Se dibuja la deformación unitaria axial, ϵ , contra la raíz cuadrada del tiempo, usualmente en minutos, para cada incremento de carga aplicado.

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)**.

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.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

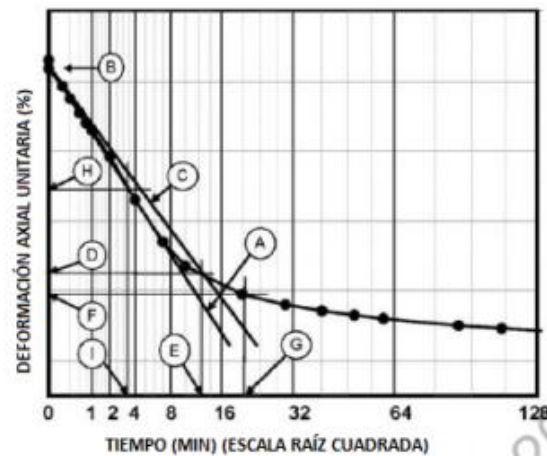
La deformación unitaria axial al 100 % de la consolidación (**F**) es 1/9 mayor que la diferencia en deformación unitaria axial entre 0 y 90 % de consolidación. El tiempo de consolidación primaria (**G**), t_{100} , se puede tomar en la intersección de la curva deformación unitaria axial-raíz cuadrada 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 %.



Nota: Esquema sin escala

Ilustración 1. Curva tiempo-deformación usando el método del logaritmo del tiempo.
Fuente: INV E 151-13.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	



- 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

Ilustración 2. Curva tiempo-deformación usando el método la raíz cuadrada del tiempo.
Fuente: INV E 151-13.

11.5. Coeficiente de consolidación para cada incremento de carga, teniendo en cuenta el método de interpretación escogido.

$$C_v = \frac{T H_{D50}^2}{t}$$

C_v = Coeficiente de consolidación, cm^2/s .

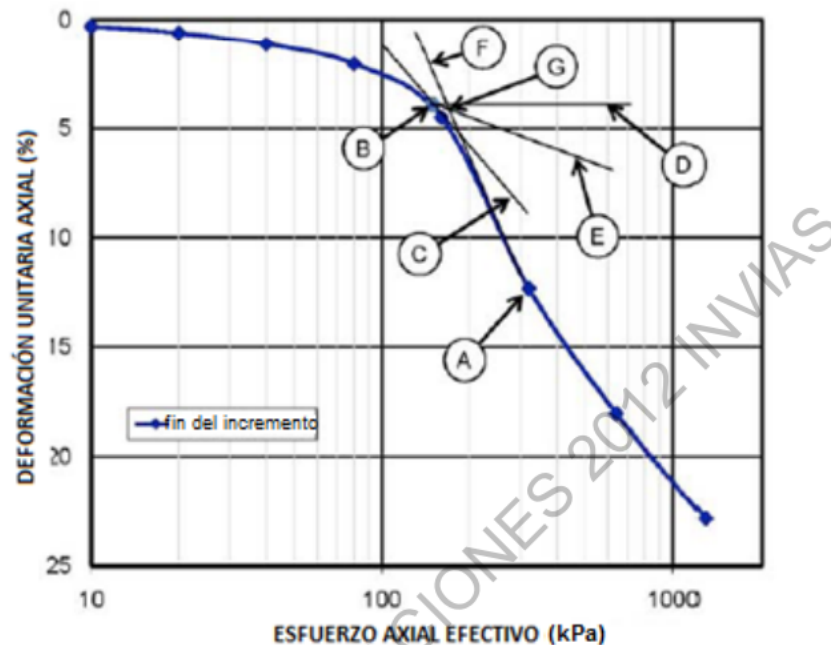
T = Un factor adimensional de tiempo: para el método 1 se usa 50% de consolidación con $T = T_{50} = 0.197$, para el método 2 se usa 90% de consolidación $T = T_{90} = 0.848$.

t = Tiempo correspondiente al grado específico de consolidación, s. Para el método 1 se usa $t = T_{50}$, para el método 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.

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 Sistema Integrado de Gestión
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

11.6. Propiedades carga-deformación:



- 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

Ilustración 3. Curva tiempo-deformación usando el método de la raíz cuadrada del tiempo.

Se tabulan las lecturas de deformación o de cambio de deformación, d_t , 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} .

Se dibujan los resultados de deformación correspondientes al final de cada incremento (en la Ilustración 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. Es preferible en algunos casos presentar la curva carga-deformación en escala aritmética. Se determina el valor del esfuerzo de pre-consolidación usando el procedimiento que se describe a continuación:

Se traza una curva suave a través de los puntos.

Se estima el punto de máxima curvatura sobre la curva de compresión (**B**).

 UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	FORMATO DE PRÁCTICAS ACADÉMICAS	Código: GD-PR-010-FR-008	 SIGUD
	Macroproceso: Gestión Académica	Versión: 02	
	Proceso: Gestión de Docencia	Fecha de Aprobación: 04/10/2017	

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).

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

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.

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. RECOMENDACIONES

Verificar el estado de los elementos antes de utilizarlos, tener cuidado al momento de manipular los equipos y materiales y por último dejar los elementos utilizados en la práctica limpios y en completo orden.

13. REFERENCIAS