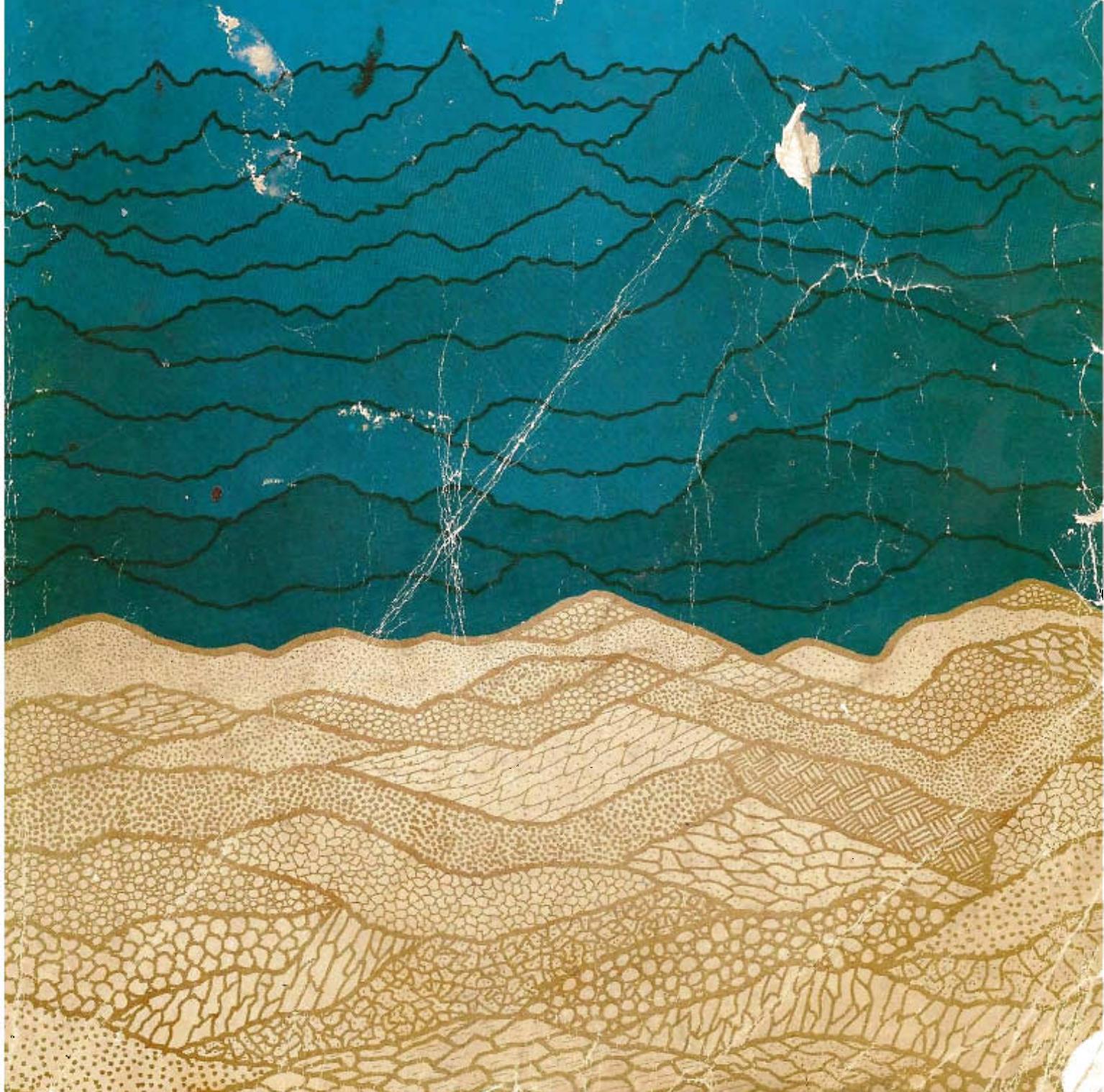


Manual de LABORATORIO DE SUELOS en Ingeniería Civil



Joseph E. Bowles



G.R.M.

**MANUAL DE
LABORATORIO DE SUELOS
EN INGENIERIA CIVIL**

M. S. C.

MANUAL DE LABORATORIO DE SUELOS EN INGENIERIA CIVIL

Joseph E. Bowles
Profesor de Ingeniería Civil

Traductor
Aquiles Arrieta G.
Profesor de Ingeniería Civil
Universidad de Los Andes
Bogotá, Colombia

Revisor
Jorge Tamayo
Profesor de Ingeniería Civil
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá

McGRAW-HILL

MÉXICO • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • GUATEMALA • LISBOA • MADRID
NUEVA YORK • PANAMÁ • SAN JUAN • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUCKLAND • HAMBURGO • JOHANNESBURGO • LONDRES • MONTREAL
NUEVA DELHI • PARÍS • SAN FRANCISCO • SINGAPUR
ST. LOUIS • SIDNEY • TOKIO • TORONTO

MANUAL DE LABORATORIO DE SUELOS EN INGENIERÍA CIVIL

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra,
por cualquier medio, sin autorización escrita del editor.

DERECHOS RESERVADOS © 1981, respecto a la primera edición en español por
LIBROS McGRAW-HILL DE MÈXICO, S.A. DE C.V.

Atlacomulco 499-501, Naucalpan de Juárez, Edo. de México
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial, Reg. Núm. 465

ISBN 968-451-046-2

ISBN 0-07-091990-9

Traducido de la segunda edición en inglés de
ENGINEERING PROPERTIES OF SOILS AND THEIR MEASUREMENTS
Copyright © 1978, by McGRAW-HILL BOOK Co., U.S.A.

ISBN 0-07-006752-X

2345678901 ¡Ojo! 8023456791

Impreso en México Printed in Mexico

Esta obra se terminó en marzo de 1981
en Poligráfica, S.A.
Av. del Taller No. 9
México 8, D.F.

Se tiraron 2 000 ejemplares

CONTENIDO

PREFACIO

definiciones de Mecánica de Suelos, procedimientos de laboratorio y preparación de informes

EXPERIMENTO No. 1	Determinación del contenido de humedad	11
EXPERIMENTO No. 2	Recolección de muestras en el campo - terreno	13
EXPERIMENTO No. 3	Límites líquido y plástico de un suelo	15
EXPERIMENTO No. 4	Límite de contracción	27
EXPERIMENTO No. 5	Análisis granulométrico -Método mecánico	35
EXPERIMENTO No. 6	Análisis granulométrico - Método del hidrómetro	47
EXPERIMENTO No. 7	Gravedad específica de los sólidos de un suelo	61
EXPERIMENTO No. 8	Clasificación de los suelos	69 ✓
EXPERIMENTO No. 9	Relaciones humedad - densidad (ensayos de compactación)	79
EXPERIMENTO No. 10	Determinación de la densidad en el campo	89
EXPERIMENTO No. 11	Coeficiente de permeabilidad - Método de la cabeza constante	97
EXPERIMENTO No. 12	Coeficiente de permeabilidad - Método de la cabeza variable	105
EXPERIMENTO No. 13	Ensayo de consolidación	111
EXPERIMENTO No. 14	Ensayo de compresión inconfinada	133
EXPERIMENTO No. 15	Ensayo triaxial - sin medición de presión de poros	141
EXPERIMENTO No. 16	Ensayo triaxial - con medición de presión de poros	161
EXPERIMENTO No. 17	Ensayo de corte directo	175
EXPERIMENTO No. 18	Determinación de la densidad relativa	185
EXPERIMENTO No. 19	Ensayo de relación de soporte de California (CBR)	189
EXPERIMENTO No. 20	Construcción de redes de flujo usando analogía eléctrica	199
EXPERIMENTO No. 21	Relaciones volumétricas - gravimétricas	207
EXPERIMENTO No. 22	Peso unitario de suelos cohesivos	211
FORMATOS PARA EXPERIMENTOS		215

PREFACIO

La presente edición ha sido reescrita y en general puesta al día de forma que refleje las modificaciones o innovaciones en procedimientos de ensayo, las sugerencias del usuario de la anterior edición y la transición que han iniciado los Estados Unidos al Sistema Internacional (SI) de unidades. He añadido dos sencillos experimentos introductorios (nos. 21 y 22) y los he colocado al final en lugar del principio, debido a que algunos de los experimentos Nos. 1 a 20 han sido grabados en cintas de televisión o han sido identificados de alguna forma permanente. Los usuarios pueden emplear, si lo desean, el experimento No. 21 para comenzar los experimentos en el laboratorio o como demostración en la primera o segunda clases de las características volumétricas -gravimétricas de los suelos e introducción al laboratorio de suelos.

Esta edición está totalmente presentada en unidades SI/métricas. Las llamo SI/métricas debido a que es normal encontrar en los equipos de laboratorio de suelos tanto unidades SI como unidades métricas de "uso preferencial". Más aún, a pesar del gran empuje que se le ha dado a la adopción del SI puro, unidades como el centímetro, el gramo y centímetro cúbico se seguirán utilizando como una simple cuestión de necesidad práctica. La forma de presentación constituye un cambio grande con respecto a la primera edición, al incluir los formatos en blanco con el texto.

En varios de los experimentos o proyectos he indicado métodos prácticos y/o trabajos preliminares que deberán ser ejecutados antes de la respectiva práctica de laboratorio, así como algunos equipos que podrán construirse muy fácilmente con el fin de mejorar la calidad del proyecto.

Al igual que la primera edición, este texto de laboratorio se ha escrito con la intención de introducir a los fundamentos básicos del ensayo de suelos en laboratorio, con énfasis en los métodos de recolección de datos, cálculos y presentación de resultados. El arreglo general de listado de equipos, fotografías, formatos típicos y presentación de información se ha mantenido igual a la primera edición. Los formatos ilustrativos se han renovado en su totalidad, y en ellos se presenta resultados reales de ensayos de suelos hechos personalmente por mí, o bajo mi supervisión, utilizando equipos métricos; no son simples conversiones de unidades de los ensayos presentados en la primera edición.

Los ensayos que se presentan en este manual siguen muy de cerca los procedimientos estándar de ensayos sugeridos por la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM) y la Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transporte (AASHTO). Se hacen algunas excepciones como en el caso de la utilización de agua destilada o equipos altamente especializados (difíciles de conseguir en laboratorios para estudiantes) y en la desviación en términos del elemento tiempo, el cual en algunos procedimientos de ensayo estándar puede ser característica esencial. Siempre que se hace una desviación de cualquier estilo se destaca adecuadamente de forma que el usuario esté conciente del hecho cuando el procedimiento no es estandar.

Quiero expresar mi especial reconocimiento al profesor E. Schaeffer del St. Lawrence College, Ontario, Canadá y al profesor Turgut Demirel de la Universidad del Estado de Iowa, quienes hicieron la revisión crítica del manuscrito. Quiero así mismo encarnar mi agradecimiento hacia los innumerables estudiantes (pre y posgraduados) cuyas ideas fueron rebuscadas en sus informes de laboratorio y utilizadas para mejorar el trabajo y la metodología del laboratorio.

Joseph E. Bowles

DEFINICIONES DE MECANICA DE SUELOS, PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO Y PREPARACION DE INFORMES

Introducción

Esta sección del manual de laboratorio proporciona información de naturaleza general. Contiene un breve artículo de referencia sobre definiciones básicas de la mecánica de los suelos, así como sobre las relaciones volumétricas y gravimétricas. En esta sección se incluye también información sobre los procedimientos generales de laboratorio que el estudiante debe estar en capacidad de emplear y una guía para la preparación de informes de laboratorio que le será igualmente útil. Se recomienda a los estudiantes leer muy cuidadosamente esta sección y consultarla a menudo a fin de asegurar la adecuada presentación de sus informes y para revisar los métodos de presentación gráfica de la información cuando sea necesario recurrir a la elaboración de curvas en algunas prácticas.

Unidades SI/Métricas usadas en este texto

En este texto no se emplean las unidades técnicas inglesas de pie-libra-segundo (fps). Comúnmente los equipos de laboratorio de suelos miden la *masa* en kilogramos (kg), unidad patrón SI, o en gramos (g) unidad menor que no es patrón en el sistema SI. Como generalmente se usa en ingeniería el peso es una unidad de fuerza (aunque muy pocas veces se le define como tal). Si se hacen las siguientes consideraciones:

$$F = ma = \frac{W}{g}(a)$$

y se reemplaza la aceleración de la gravedad, g , por la aceleración en la ecuación anterior, se tiene que $F = W$ (donde W es la fuerza de cuerpo o peso producido por el efecto del campo gravitacional de la tierra sobre la masa del cuerpo en consideración). La aceleración normal de la gravedad (la cual varía ligeramente con la localización sobre el globo terráqueo) se basa en la elevación del nivel del mar a una latitud de 45°N y es muy cercana a los 9.807 m/s². La unidad SI de fuerza es el newton (N), equivalente a 100 000 dinas. El newton se puede definir como la fuerza que producirá en una masa de 1 kg una tasa de aceleración de 1 m/s². Un gramo fuerza = 980.7 dinas (también la aceleración de la gravedad en cm/s²), y entonces se tiene que:

$$F = 1 \text{ gm (masa)} \times 980.7 \text{ cm/s}^2 \text{ (unidades de fuerza = dinas)}$$

Si se divide por 980.7 dinas/gm, es claro que los gramos masa y los gramos fuerza son intercambiables (al igual que los kilogramos) siempre que se trabaje con la constante gravitacional normal. Esto ha causado muchas confusiones en el pasado, pero podrá disminuir como problema en el futuro pues el newton (fuerza) supone una aceleración de 1 m/s² (no la aceleración de la gravedad).

Para trabajar en problemas relacionados con los suelos se usarán las siguientes unidades (con las abreviaciones mostradas). Es importante destacar que las unidades intermedias utilizadas serán compatibles con los equipos de laboratorio, y que las unidades se registrarán finalmente en sistema SI.

CANTIDAD	UNIDAD INTERMEDIA NO-PATRON	UNIDAD SI
Longitud	centímetro (cm)	Milímetro (mm) o metro (m)
Volumen	centímetro cúbico (cm^3 , también, cc milímetro (ml)).	metro ³ (m^3)
Masa	gramo (g)	kilogramo (kg)
Peso	gramo (g) o kilogramo (kg)	newton (N) o kilonewton (kN)
Peso unitario	g/cm^3 , algunas veces tonelada/ m^3 una tonelada = 1000 kg.	kilonewton/ m^3 (kN/m^3) kN = 1000 N
Presión	kg/cm^2	N/m^2 (pascal (Pa), en trabajos de suelos se usa el kilopascal (kPa))
Energía		newton-metro = Julio (J) momento = N · m (pero <i>no</i> es un Joule).

Los siguientes factores de conversión son muy útiles:

1 pulgada	=	2.54 cm (dígitos exactos)
1 gramo	=	980.7 dinas = 980.7 gm·cm/s ²
1 newton	=	1000000 dinas
1 psi	=	0.07031 kg/cm^2
	=	6.89428 kPa
1 lb/pie ³	=	0.157093 kN/m ³
1 pie ³ H ₂ O	=	62.4 lb/pie ³ (pcf)
1 m ³ H ₂ O	=	9.807 kN/m ³
1 gm/cm ³	=	9.807 kN/m ³
1 galón(USA)	=	3.785 litros = 0.003785 m ³

Definiciones fundamentales

Refiriéndonos a la Fig. 1-1a, tenemos un volumen de suelo sacado de su sitio natural en el campo, más, suponemos que el suelo fue removido en forma de cubo con 1 cm de arista (volumen = 1 cm^3). Esto es realmente difícil de lograr en la práctica, pero para ilustrar las relaciones de volumen/peso que se presentan a continuación, suponemos que es posible remover un bloque de suelo en forma cúbica perfecta. Este cubo está conformado por un esqueleto de suelo con agua y aire en sus intersticios, o *poros*, entre los puntos de contacto de las partículas de suelo (Fig. 1-1b). Es evidente que, dependiendo de la localización (*in-situ*) del cubo en el campo y de factores climáticos, la cantidad relativa de agua y aire puede variar en la totalidad de los poros desde tener todos los poros llenos de agua sin aire presente, hasta tener todos los poros llenos de aire y sin agua. Dependiendo de la temperatura instantánea, el agua podría estar presente en forma de hielo o de una mezcla agua-hielo.

Con el propósito de observar mejor la composición del cubo de suelo, se drena toda el agua presente en el cubo y se coloca en un recipiente. A continuación se calienta el esqueleto de partículas de suelo hasta que se fundan y fluyan para formar una masa sólida sin esqueleto (sin poros) que ocupe un volumen V_s de un recipiente con un volumen total de 1 cm^3 . Nótese que antes el esqueleto de suelos ocupaba todo el volumen de 1 cm^3 . El volumen real de los sólidos del suelo, V_s , es menor que 1 cm^3 . A continuación se echa el volumen de agua drenada del cubo original, V_w , en el recipiente de 1 cm^3 de volumen sobre la masa de sólidos fundidos (Fig. 1-1d). Si los poros del esqueleto de suelos hubiesen estado llenos de agua, sería evidente que la suma del volumen de sólidos del suelo y el volumen ocupado por el agua llenaría el recipiente de 1 cm^3 . Como en este caso ilustrativo los poros no estaban llenos de agua, el volumen sobrante para llenar el recipiente de 1 cm^3 debe ser igual al volumen de aire V_a , presente en el esqueleto de suelo original.

Para conveniencia de los desarrollos posteriores, es necesario hacer las siguientes suposiciones:

1. el suelo tiene peso
2. el aire no tiene peso (para los volúmenes involucrados).

3. El agua tiene peso. En general se tomará como 1 g/cm^3 (9.807 kN/m^3) aunque este valor sólo es correcto a una temperatura de 4°C . A temperatura entre 18°C y 25°C , el peso varía entre 0.9986 y 0.9971 g/cm^3 (ver Tabla 6-1).

Los siguientes símbolos se usarán en las definiciones que siguen:

- e = relación de vacíos
- G = gravedad específica de cualquier sustancia
- G_s = gravedad específica de los sólidos del suelo
- G_w = gravedad específica del agua
- n = porosidad
- w = contenido de humedad
- S = grado de saturación
- W_s = peso seco de los sólidos
- W_t = peso total de la masa incluyendo el agua presente
- W_w = peso del agua presente en la masa de suelos
- V_a = volumen del aire presente en la masa de suelos
- V_s = volumen de los sólidos del suelo
- V_t = volumen total de la masa de suelos = $V_s + V_w + V_a$
- V_w = volumen de agua en la masa de suelos
- V_v = volumen de los vacíos en la masa de suelos = $V_w + V_a$
- γ = peso unitario de un material (g/cm^3 ó kN/m^3)
- γ_d = peso unitario seco de una masa de suelos
- γ_s = peso unitario saturado de una masa de suelos
- γ_w = peso unitario del agua

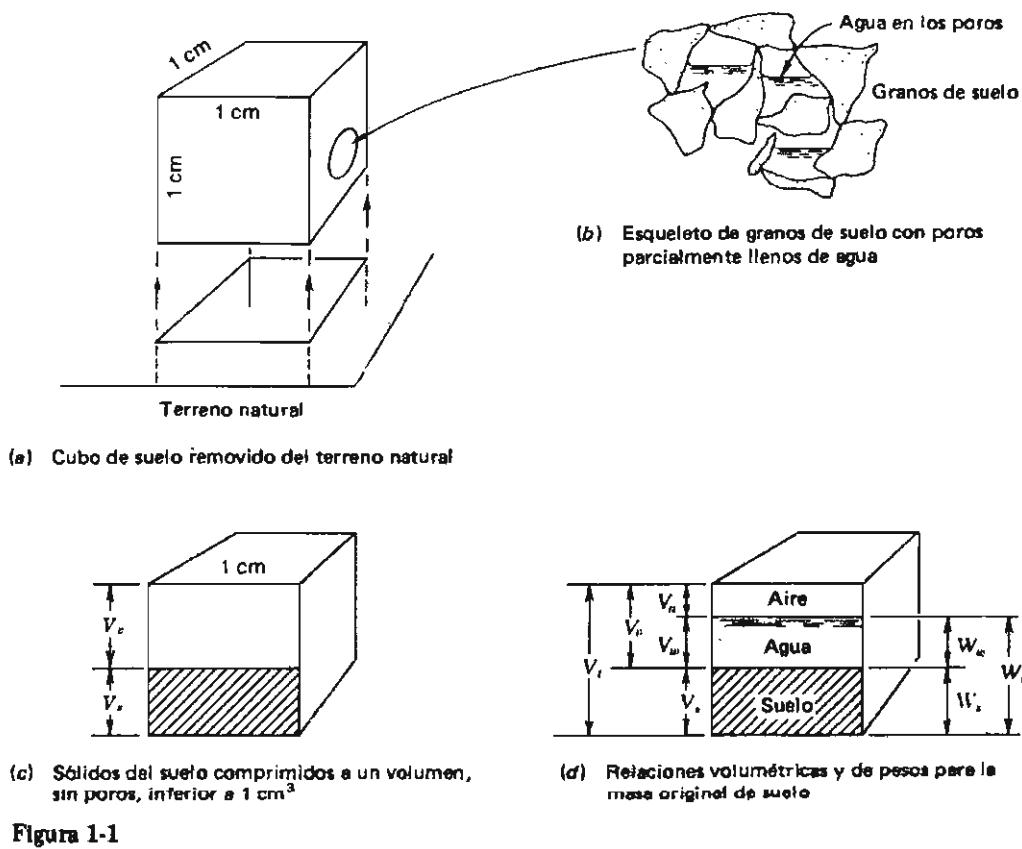


Figura 1-1
Relaciones volumétricas y gravimétricas.

En referencia a la Fig. 1-1d, se define la *relación de vacíos e* como

$$e = \frac{V_v}{V_t} \quad (1-1)$$

La relación de vacíos se expresa usualmente en forma decimal.

La *porosidad n* se define como

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (1-2)$$

La porosidad puede expresarse en forma decimal o porcentual; el uso decimal es preferido.

Al sustituir la Ec. (1-1) en la Ec. (1-2), se obtiene la siguiente expresión para la relación de vacíos en términos de la porosidad.

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-3)$$

El *grado de saturación S* se define como

$$S = \frac{V_w}{V_t} 100 \quad \text{por ciento} \quad (1-4)$$

Nótese que el rango de *S* varía entre 0 y 100 por ciento y que, si

$S = 0\%$, el suelo está *seco*

$S = 100\%$, el suelo está *saturado*

El *peso unitario* de un suelo es

$$\gamma = \frac{W_t}{V_t} \quad (1-5)$$

Esta definición también es aplicable a otras sustancias tales como hierro, cobre, carbón y aceite. Nótese que si el suelo está *seco* ($S = 0\%$), $W_t = W_s$ y se calcula el *peso unitario seco* como:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

Si $S = 100\%$, $W_t = W_s + W_w$ y se usa la ec. (1-5) se calcula el *peso unitario saturado* γ_s .

Si $0 < S < 100$ por ciento, W_t es aún calculado como $W_t = W_s + W_w$ y entonces la Ec. (1-5) permite calcular el *peso unitario húmedo* del suelo. En términos generales es necesario mirar el contexto del problema dado para poder establecer cuál peso unitario es necesario describir o determinar, ya que, como lo indica el material anterior, es posible calcular más de un peso unitario para un mismo suelo dado, dependiendo de qué fracción de peso se utilice en el numerador de Ec. (1-5).

A partir de consideraciones fundamentales, se puede expresar el volumen de cualquier material como

$$V = \frac{W}{G \gamma_w} \quad (1-6)$$

Así tomando en referencia la Fig. 1-1d, el volumen de los sólidos del suelo V_s es

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_{lo}} \quad (1-6a)$$

El volumen en agua V_w es

$$V_w = \frac{W_w}{G_w \gamma_w} = W_w \quad (1-6b)$$

ya que G_w y γ_w son ambas aproximadamente iguales a 1.0 para el agua en condiciones usuales de campo y de laboratorio (*en sistema métrico técnico únicamente*).

El *contenido de humedad w* se define en el experimento No. 1. Por conveniencia, sin embargo, la ecuación que define al contenido de humedad se repite aquí:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad \text{por ciento}$$

El método para determinar la gravedad específica de un suelo G_s se describe en el experimento No. 7.

Si se hacen las suposiciones y sustituciones del caso, es posible derivar una serie de relaciones recíprocas, como las siguientes:

Cantidades dadas	Encontrar	Expresión derivada
γ_{lo}, G_s	e	$e = \frac{G_s}{\gamma_{lo}} - 1$
$G_s, w (S = 100\%)$	n, e	$n = \frac{w G_s}{1 + w G_s}$ $e = w G_s$ Generalmente: $S e = w G_s$
G_s, e	γ_{lo}, γ_s, n	$\gamma_{lo} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e}$ $\gamma_s = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w$ $n = \frac{e}{1 + e}$

Es posible derivar más relaciones, pero esto se deja al estudiante en calidad de ejercicio.

Ejemplo:

Dados los siguientes datos:

Peso del recipiente + arena húmeda	= 248.6 g
Peso del recipiente + arena seca	= 231.2 g
Peso del recipiente	= 63.7 g
Volumen del recipiente	= 100 cm ³

Encontrar: (1) contenido de humedad w , (2) peso unitario seco, (3) peso unitario húmedo y (4) relación de vacíos, si $G_s = 2.68$.

SOLUCION

$$1. w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{248.6 - 231.2}{231.2 - 63.7} \times 100 = \frac{17.3}{167.5} \times 100 = 10.3\%$$

$$2. \gamma_d = \frac{W_s}{V_t} = \frac{167.5}{100} = 1.675 \text{ g/cm}^3 = 1.675 \times 9.807 = 16.43 \text{ kN/m}^3$$

$$3. \gamma_{wet} = \frac{W_{wet}}{V_t} = \frac{184.8}{100} \times 9.807 = 18.12 \text{ kN/m}^3$$

También $W_t = W_s + W_w = W_s + wW_s$ (del paso 1). Ahora se divide por V :

$$\frac{W_t}{V_t} = \frac{W_s}{V_t} + \frac{wW_s}{V_t} = \gamma_{wet} = \gamma_d + w\gamma_d$$

$$\gamma_{wet} = 16.43 + 0.103(16.43) = 18.12 \text{ kN/m}^3 \text{ como encontramos antes}$$

$$4. e = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{pero} \quad V_v = \frac{W_s}{G_s \gamma_w} = \frac{167.5}{2.68(1)} = 62.5 \text{ cm}^3$$

$$V_v = V_t - V_s = 100 - 62.5 = 37.5 \text{ cm}^3$$

$$e = \frac{37.5}{62.5} = 0.60$$

Procedimiento en el laboratorio

El equipo de laboratorio es costoso y esto se puede apreciar con propiedad al analizar una lista de precios actualizada de cualquier proveedor. Durante el curso del semestre se puede indicar en diferentes oportunidades el costo de algunas piezas del equipo. El manejo de los equipos debe ser cuidadoso pues son muy sensibles y cualquier pequeño daño en ellos puede causar serios errores en la ejecución de las prácticas. Las balanzas son especialmente susceptibles a los daños. Por esta razón, se recomienda moverlas de un sitio a otro cuando sea necesario, bajo la supervisión del instructor. Las balanzas de triple viga utilizadas primordialmente en la determinación de contenidos de humedad deben siempre bloquearse al final de cada período de laboratorio. En general, es aconsejable hacer una verificación de la lectura de cero antes de utilizar cualquier balanza, así como para minimizar los efectos de posibles errores de cero es conveniente hacer toda serie de pesadas en la misma balanza. En algunos ensayos es necesario hacer mediciones de pesos muy pequeños; en tales casos los errores de balanza pueden ser de gran importancia.

Los hornos de secado deben fijarse a una temperatura entre 105°C y 110°C y sus termostatos no deben ser manipulados sin autorización del instructor, pues toma un tiempo considerable estabilizar la temperatura del horno para ajustarlo nuevamente. En trabajos de mecánica de suelos es esencial mantener esta temperatura en particular. Las muestras horneadas deben ser removidas del horno por la persona encargada a más tardar 24 h después de haberlas colocado allí. El instructor puede reservarse el derecho de botar las muestras que hayan permanecido más tiempo en el horno. Esta regla permite apagar los hornos cuando su uso no sea necesario.

Cada grupo debe limpiar y responsabilizarse por su área de trabajo. Deben recordar que sus compañeros también utilizan el equipo y que si es necesario lavar y secar cada vez que se necesite conocer el peso de un aparato, se estará perdiendo tiempo muy valioso para la práctica de laboratorio.

Informes de laboratorio

Cada proyecto requiere la presentación de un informe de laboratorio a menos que el instructor haya dicho algo diferente al respecto. Este informe se debe presentar en una carpeta o exfoliador —un informe por carpeta— y debe cubrir la siguiente información:

1. Nombre del estudiante
2. Título del proyecto
3. Código y sección de su curso de laboratorio
4. Número del grupo de laboratorio
5. Fecha del proyecto y de la entrega del informe

El informe debe escribirse a máquina o, de no ser posible, utilizar bolígrafo y letra de imprenta *pulcramente manuscrita*: debe, asimismo, incluirse el material que se enumera a continuación, en la secuencia aquí dada:

1. *Hoja de créditos* o de presentación, con el título del proyecto, nombre del estudiante, código del curso, fecha de entrega del informe, y nombres de los compañeros de grupo.
2. *Introducción*. Es un breve sumario (media página o menos) de los objetivos del trabajo.
3. *Discusión del trabajo*. Comentar las técnicas especiales o cambios realizados con respecto a la información del manual de instrucciones de laboratorio. Discutir las limitaciones de equipo, así como las posibles causas de error. Si los resultados obtenidos no son muy buenos hacer un análisis sobre las causas probables de ello. Si se utilizaron ecuaciones diferentes a las utilizadas como definiciones básicas, incluirlas y anunciar que su derivación se incluye en la parte de cálculo. La "discusión" en general debe ser del orden de $1\frac{1}{2}$ páginas.
4. *Conclusiones*. Son un breve sumario y tabulación de los resultados obtenidos en el proyecto. Si en su concepto es posible hacer mejoras, se deberían listar en esta parte del informe; sin embargo, no se debe calificar si se logró mucho (o poco) del experimento pues esto no se considera una "conclusión". Esta parte debe tener una extensión cercana a media o una página, dependiendo de la cantidad de información que deba ser presentada. En esta sección del informe es necesario tabular los resultados del ensayo.
5. Presentar a continuación los gráficos que se necesite incluir y a continuación adjuntar los registros de datos de laboratorio, preferiblemente en los formatos suministrados para ese particular. Los formatos de la sección final de este manual pueden desprendérse y luego remover la arista rota cortando por la línea perforada. No volver a copiar los datos experimentales —hacerse al hábito de registrar la información en forma pulcra (o por lo menos razonablemente presentada). El informe debe contener los datos originales; si ha sido recopiado, elabore una lista de los miembros del grupo que tomaron originalmente los datos.
6. *Cálculos*. No es necesario efectuar cada operación en vía de demostración, pero sí se debe mostrar un cálculo típico. Si los datos deben usarse en varios cálculos utilice los mismos para todos los cómputos ejecutados. Asegúrese de indicar toda derivación requerida para llegar a las ecuaciones que utilizó en el manejo de los datos.

El informe debe hacerse siguiendo las mejores normas para la redacción de material técnico, influyendo *en forma adecuada* las citas de todas las referencias bibliográficas usadas. En escritura técnica no debe emplearse lenguaje personalizado (yo, usted, nosotros, nuestro, etc. . . .); no se debe escribir frases como "encontré que . . ." ó "mi grupo encontró . . ."; en lugar debe decirse "se encontró que . . .". La ortografía debe ser correcta, en caso de dudas debe recurrirse a un diccionario. Se debe tratar de escribir utilizando una construcción gramatical correcta y nunca intercambiar tiempos verbales —pasado a presente— en la misma frase o párrafo. La mayoría de estos problemas pueden evitarse si se observan los siguientes consejos:

1. Releer el informe uno o más días después de escrito. Uno o más tachones en el texto serán mejor recibidos por el instructor que un párrafo equivocado o que suena ridículo; además esto indica que revisó el trabajo antes de entregarlo.
2. Escribir con calma, de forma que las letras finales de cada palabra sean claras y que la ortografía sea correcta.
3. Pensar bien en lo que se quiere decir y ser breve en su presentación. Unas pocas frases bien armadas son más efectivas que un informe largo, pobemente escrito, que no diga nada.
4. Consultar (tal vez en la biblioteca) un texto sobre técnicas de escritura de informes técnicos.

Un propósito primordial del informe es indicarle al instructor lo aprendido en el proyecto. Como beneficio adicional se adquiere práctica en la escritura de informes técni-

cos y en la presentación de datos de ingeniería. Aun cuando se califica principalmente el proyecto y la presentación de datos (y no la escritura del informe), es obvio que un informe mal o pobemente escrito tendrá generalmente menor calificación que uno bien escrito.

Aunque generalmente el estudiante no aprecia en esta etapa la formalidad involucrada en los informes, es importante que trate de entender que la escritura de éstos es una actividad esencial de la mayoría de los ingenieros. Más aún, si la mecánica de suelos no es de uso temprano en el ejercicio profesional, sino varios años después de graduado, será necesario recurrir a material de repaso ágil —como los viejos informes de laboratorio— los cuales serán muy fáciles de seguir, si están bien escritos.

Dibujo de Gráficas

Una gráfica debe ser clara, legible y fácil de comprender. El papel de gráficas usado debe tener la malla aritmética o logarítmica necesaria para hacer la gráfica respectiva y un tamaño estándar de 215×28 cm, ($8\frac{1}{2} \times 11$ pulg en los Estados Unidos), generalmente no es aconsejable pegar varias hojas —para aumentar el número de ciclos logarítmicos, pues es difícil manejar las hojas dobladas resultantes. Es recomendable el uso de papel milimetrado, pero desafortunadamente en este momento (1977), el papel estándar en los Estados Unidos es de $8\frac{1}{2} \times 11$ pulg.

Al dibujar curvas, es necesario colocarlas dentro del papel de gráficas de forma que se deje un margen *izquierdo e inferior* de por lo menos 2 cm de ancho. Los letreros de la gráfica deben hacerse *sobre la porción rayada de la hoja*, usando dicho rayado como guía para la escritura. La escala escogida para cada eje debe ser tan grande como sea posible, siempre que sea fácil de dibujar o leer. Por ejemplo, escalas de 5 ó 10 divisiones/cm sirven para dibujar bien en múltiplos de 1 y 5 unidades (a veces 4), pero escalas de 3, 6 ó 7 unidades/división son incómodas para dibujar y leer.

En cada gráfica (Fig. 1-2) se debe mostrar un título que incluya:

1. Título del proyecto (*Ejemplo*: Densidad seca vs. contenido de humedad).
2. Tipo de suelo (*Ejemplo*: Arcilla limosa parduzca, $w_L = 42.1\%$; $w_p = 21.3\%$).
3. Fecha del trabajo (*Ejemplo*: 10 de enero de 1980).
4. Escala (si es necesario).
5. Nombre de la persona que hizo la gráfica.

El título debe colocarse siempre en la esquina superior derecha o inferior derecha de la gráfica. Cuando se muestran en una misma gráfica los resultados de diferentes prácticas, debe incluirse una leyenda que permita identificar los datos de cada práctica diferente como se indica en la Fig. 1-2. La presentación de varias curvas en una misma gráfica se mejora utilizando además diferentes colores o tipo de líneas (sólida, punteada, etc.).

Los puntos experimentales deben graficarse como se ilustra en la Fig. 1-2 en lugar de usar sólo puntos (nótese que la línea de la curva respectiva no pasa sobre los puntos experimentales) de modo que sea fácil verificar la interpretación hecha sobre los datos logrados. Se debe siempre dibujar curvas continuas utilizando curvígrafo o curva francesa (nunca mano alzada), a menos que el instructor solicite unir los puntos con segmentos de recta. Las gráficas siempre deben orientarse de tal manera que el lomo del informe quede a la izquierda o en la parte superior.

Piense detenidamente en la información que debe presentarse en la gráfica antes de hacerla. ¿Es cualitativa (relativa) o cuantitativa (numérica), o ambas? Obviamente, la información cuantitativa requiere mejor escala que la cualitativa. Como de costumbre (en textos, etc.) presentar el mismo tipo de datos: i.e. ¿Controla la abscisa o la ordenada el gráfico? Como ejemplo, en general (no siempre) es más acostumbrado dibujar gráficas que exhiben comportamiento asintótico con respecto al eje horizontal que hacerlo con respecto al vertical.

Es bueno mostrar en la gráfica los valores que se van a deducir de los datos experimentales mostrados. Si estos valores se utilizan para calcular constantes (por ejemplo, el módulo de elasticidad), muestre los cálculos y la constante en la gráfica.

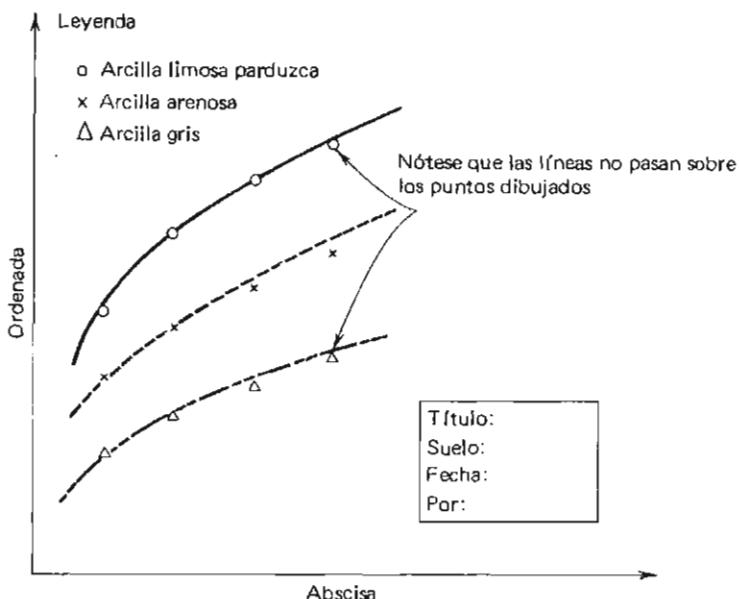


Figura 1-2

Forma de presentación de datos de varios ensayos en la misma gráfica. Nótese el uso de símbolos y tipos de líneas para separar la información. Para propósito de identificación debe incluirse algún tipo de título.

Práctica de Laboratorio

Los procedimientos que se presentan en los ensayos siguientes son razonablemente estándar. Por ejemplo, la ASTM¹ en su versión de estos ensayos especifica muy a menudo el uso de agua destilada; pero esto puede omitirse (a discreción del instructor) utilizando en su lugar agua común con la cual, en general, se comete un error negligible. Igualmente es posible modificar los métodos de preparación de muestras y los tiempos de ensayo en favor de la economía del tiempo del estudiante. Es necesario disponer de una copia de la parte 19 del Manual de Normas de la ASTM (la ASTM publica normas para ensayos de materiales y especificaciones en 48 partes; todos los ensayos de suelos que se han normalizado hasta la fecha se encuentran en la parte 19) en el laboratorio de suelos o en la biblioteca para uso del estudiante interesado. Los ensayos de suelos que se presentan en las páginas siguientes de este manual incluyen una lista de designación de la correspondiente norma ASTM y AASHTO² (si existe) para convención de referencia. Por ejemplo, la designación de la norma ASTM para el ensayo del experimento No. 1 es D2216-71, donde D2216 identifica el ensayo y 71 es el año de adopción de la respectiva norma. Si aparece una letra T luego del año de adopción, esto indica que la norma es apenas tentativa.

El suelo es un material de naturaleza variable y esta variabilidad no puede ser significativamente controlada por el ingeniero, quien debe trabajar con el material tal como lo encuentra, aunque es posible alterar su estructura o cambiar su composición al mezclarlo con materiales externos. Los ensayos de suelos tienen como propósito identificar (o clasificar) el material, determinándole ciertas propiedades físicas y estableciendo criterios de control sobre el material.

¹ American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales) 1916 Pace Street, Philadelphia, Pa. 19103.

² American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Agencias Estatales de Carreteras y Transportes), 341 National Press Building, Washington, D. C. 20004.

Como es obviamente imposible ensayar la masa de suelos completa y como el suelo es un material variable, es necesario hacer varios ensayos sobre cantidades pequeñas de suelo que permitan extraer los resultados a la masa completa. Para que los ensayos sean válidos para la masa de suelos, deben ser ejecutados sobre muestras que se consideren *representativas* de la misma. Se requiere gran cuidado en las operaciones de muestreo para obtener muestras verdaderamente *representativas*. Es necesario que el personal de campo tome en bolsas muestras que sean representativas. Se deben escoger las muestras más pequeñas como representativas del suelo contenido en la respectiva bolsa. Así, si se toman unos pocos terrenos de la parte superior de la bolsa es muy improbable poder obtener una muestra representativa del conjunto. Es necesario tener siempre en mente el hecho de que, como ingeniero de suelos, se debe estimar con ensayos realizados sobre unos pocos gramos de material el comportamiento de una gran masa de suelos.

La calculadora electrónica de bolsillo ha vuelto absoleta a la antigua regla de cálculo para operaciones de ingeniería y tiende a introducir una precisión ficticia en los resultados calculados. Es importante prevenir al usuario de este texto sobre las limitaciones de los datos experimentales al hacer cálculos. Los únicos cálculos de este manual que justifican la utilización de dos posiciones decimales (al 0.01 más cercano) en la respuesta final, son el ensayo de gravedad específica (Experimento No. 7) y los ensayos de densidad (Experimentos Nos. 9 y 10). Ninguno de los otros ensayos justifica en realidad el uso de más de una posición decimal (al 0.1 más cercano). Por consiguiente, aunque se esté tomando el resultado promedio de dos o más prácticas, es necesario redondear y registrar la respuesta a la 0.1 más cercana (o a la 0.01 para los tres ensayos citados).

Unidades de ingeniería y toma de datos

Cuando se utilizan formatos para registrar los datos de laboratorio es necesario *colocar siempre las unidades* de los deformímetros, anillos de carga, celdas de presión o cualquier información adicional que pueda necesitarse posteriormente al manejar los datos de laboratorio para completar los cálculos del respectivo ensayo. *No se pueden omitir nunca estas unidades* debido a que posteriormente podrían olvidarse o, más importante aún, si es necesario referirse a este informe varias semanas o meses después, se dispone del registro de las unidades usadas y del proceso seguido para obtener los resultados mostrados. Esto será especialmente crítico en los próximos años cuando los laboratorios reemplacen sus equipos absoletos o desgastados por equipos en sistemas SI/métrico de forma que cuando se tomen los datos de laboratorio ambos tipos de equipo puedan ser utilizados.

Experimento N° 1

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Referencias

ASTM D2216-71 (Normas ASTM parte 19).

Equipo

Recipientes para humedad (aluminio o latón)
Horno con control de temperatura adecuado

Exposición General

La determinación de contenido de humedad es un ensayo rutinario de laboratorio para determinar la cantidad de agua presente en una cantidad dada de suelo *en términos de su peso en seco*. Como una definición,

$$w = \frac{W_w}{W_s} 100 \quad \text{por ciento} \quad (1-1)$$

donde W_w es el peso de agua presente en la masa de suelos y W_s es el peso de los sólidos en el suelo. Podría definirse el contenido de humedad como la relación del peso de agua presente y el total de peso de la muestra (i. e., peso de agua más suelo); sin embargo, esto daría una cantidad en el denominador de la fracción que podría depender de la cantidad de agua presente:

$$w' = \frac{W_w}{W_s + W_v} = \frac{W_w}{W_t} \quad (1-2)$$

y esto no es deseable pues el contenido de humedad estaría de esa forma relacionado a una cantidad variable y no a una cantidad constante. Esto puede verse fácilmente pues W_w aparece en ambos, numerador y denominador de la fracción: ec. (1-2). El contenido de humedad se expresa algunas veces en función del volumen como

$$\Theta = \frac{V_w}{V_s + V_v} = \frac{V_w}{V_t} \quad (1-3)$$

el cual, luego de una manipulación adecuada, puede reescribirse como

$$\Theta = w \gamma_d \quad (1-4)$$

donde V_w = volumen de agua presente en la masa del suelo
 V_v = volumen de los vacíos del suelo
 V_s = volumen de los sólidos del suelo
 w = contenido de humedad, de la ec. (1-1)
 γ_d = densidad seca del suelo (volumétrica)

Esta definición de contenido de humedad es muy raramente usada en los Estados Unidos.

Procedimiento

1. Pesar una cápsula o recipiente de aluminio o latón, incluyendo su tapa. Identificar y revisar adecuadamente el recipiente. Las cápsulas de humedad normalmente pueden ser de diferentes tamaños, siendo las más populares las de 5 cm de diámetro por 3 cm de altura y las de 6.4 cm de diámetro por 4.4 cm de altura.
2. Colocar una muestra representativa de suelo húmedo en la cápsula y determinar el peso del recipiente más el del suelo húmedo. Si el peso se determina inmediatamente, no es necesario colocar la tapa. Si se presenta una demora de 3 a 5 minutos o más, coloque la tapa del recipiente para mantener la humedad y coloque la cápsula bajo una toalla de papel húmeda que le permita mantener la humedad en la vecindad del recipiente.
3. Despues de pesar la muestra húmeda más el recipiente, remueva la tapa —es práctica común colocar la tapa debajo del recipiente— y coloque la muestra en el horno.
4. Cuando la muestra se haya secado hasta mostrar un peso constante, determine el peso del recipiente más el del suelo seco. Asegúrese de usar la misma balanza para todas las mediciones de peso.
5. Calcule el contenido de humedad w . La diferencia entre el peso de suelo húmedo más el del recipiente y el peso de suelo seco más el del recipiente es el peso del agua W_w que estaba presente en la muestra. La diferencia entre el peso de suelo seco más el del recipiente y el peso del recipiente solo es el peso del suelo W_s , y

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad \text{por ciento} \quad (1-1)$$

El suelo debe secarse en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta obtener un *peso constante*; i. e., mientras haya agua presente para evaporar, el peso continuará disminuyendo en cada determinación que hagamos en la balanza. En general, no es muy práctico hacer varias medidas del peso para determinar si se ha obtenido un estado de peso constante en la muestra; lo que se hace comúnmente es suponer que después de un período de horneado de 12 a 18 horas (a menudo durante la noche), la muestra se encuentra en estado de peso constante y dicho peso se registra como el del suelo seco más el del recipiente. La experiencia indica que este método de secado de muestras es bastante adecuado para trabajo rutinario de laboratorio sobre muestras pequeñas.

Es práctica común retirar del horno las muestras para contenido de humedad y pesarlas inmediatamente (se debe utilizar un par de pinzas o guantes de asbesto pues se encuentran demasiado calientes). Si por alguna razón no es factible pesar las muestras secas inmediatamente, es necesario poner la tapa del recipiente tan pronto se haya enfriado lo suficiente para manipularla y/o colocar el recipiente de suelo seco en un desecador eléctrico de manera que el suelo no absorba agua de la atmósfera del laboratorio.

Para lograr una determinación confiable del contenido de humedad de un suelo se recomienda utilizar la siguiente cantidad mínima de muestra húmeda (*muestra representativa*):

Tamaño máximo de las partículas de muestra (96-100m para el tamiz dado)	Peso mínimo recomendado de la muestra (g)
No. 4 (4.75 mm)	100
No. 40 (0.420 mm)	10 a 50
12.5 mm	300
50.0 mm	1,000

La temperatura de 110°C en el horno es demasiado alta para ciertos suelos orgánicos (turbas), para suelos con alto contenido calcáreo o de otro mineral, ciertas arcillas, y algunos suelos tropicales. Estos suelos contienen agua de hidratación levemente adherida, o agua molecular, que podría perderse a estos niveles de temperatura, dando como resultado un cambio en las características del suelo —notable en los límites de Atterberg del Experimento No. 3 lo mismo que en la gradación y en la gravedad específica. La ASTM sugiere secar estos suelos a una temperatura de 60°C .

Experimento N° 2

RECOLECCION DE MUESTRAS DE SUELO EN EL TERRENO

Referencias

AASHTO T86-70

ASTM D420-69

Leer "Determinación del Contenido de Humedad" (Exp. No. 1).

Objetivos

Esta práctica tiene como propósito:

1. Enseñar al estudiante un método para la obtención de muestras de suelo alterado.
2. Capacitar al estudiante para obtener una indicación de la variación, según la profundidad, del contenido de humedad natural del suelo.
3. Recolectar información para dibujar un perfil de suelos simple.
4. Obtener una bolsa de suelo para futuras prácticas de laboratorio¹.

Equipo

Barreno manual de 5 cm ó 7.6 cm de diámetro (o barreno continuo accionado por pequeño motor de gasolina).

Varillas de extensión para el barreno que permitan bajar por lo menos a 6 m de profundidad.
2 bolsas para muestras por grupos.

12 latas o recipientes para contenido de humedad por grupo (obtener su peso vacío antes de salir al terreno).

Llaves de tuerca grande para manipular las varillas de extensión para el barreno.

Cinta métrica de 30 m para localizar las perforaciones.

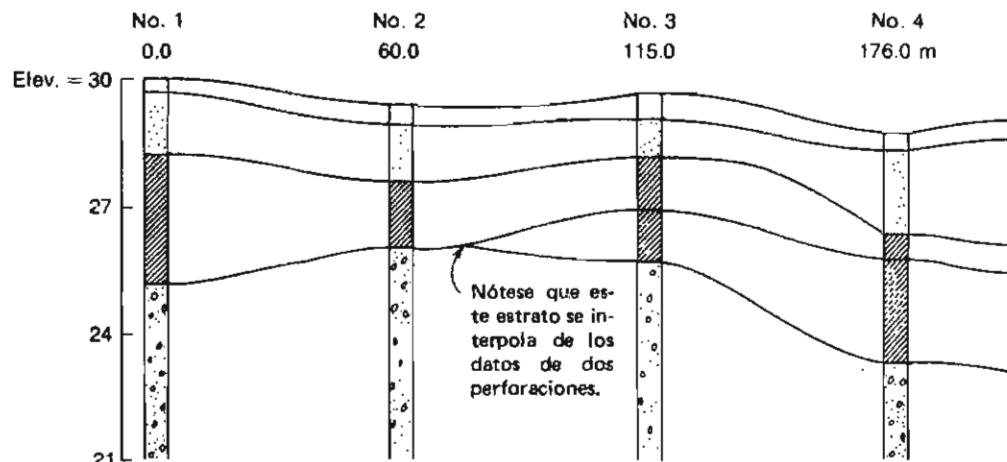
Procedimiento *Esta será una práctica de grupo*

1. Cada grupo debe perforar con un barreno un agujero de por lo menos 6 m de profundidad.
2. Tomar dos muestras para contenido de humedad por cada metro de perforación y donde se produzcan cambios visuales en el estrato de suelo. Colocar las tapas de los recipientes de humedad inmediatamente después de obtener la muestra de forma que se minimice la pérdida de humedad. Al regresar al laboratorio, pese los recipientes que contienen suelo húmedo, *retire las tapas*, y coloque las muestras en el horno para secar. Regrese al laboratorio el día siguiente, pese el suelo seco y calcule el contenido de humedad. El promedio de los dos valores obtenidos para el contenido de humedad se toma como el valor correspondiente a la profundidad de la muestra.

¹ Si este experimento no se hace debido a falta de tiempo o a mal clima, se sugiere que el instructor obtenga una muestra de suelo de un sitio de construcción cercano, durante un tiempo de buen clima y con anterioridad a la clase, y lo almacene para futuros ensayos de laboratorio.

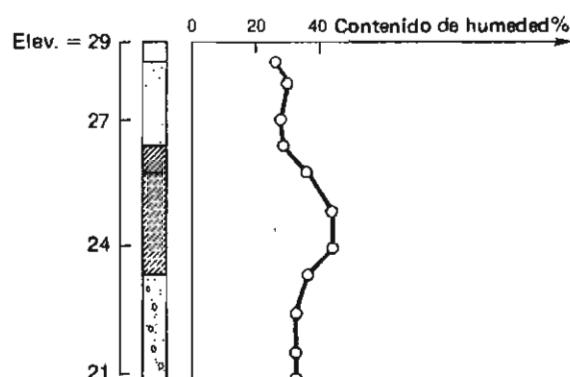
3. Es necesario recolectar dos bolsas de suelo arcilloso por grupo (o suficiente material para contar con unos 10 kg de suelo seco al aire). Estas bolsas deberán llevarse al laboratorio, identificarse mediante un rótulo y almacenarse para una posterior práctica de suelos, excepto 5 kg que serán puestos inmediatamente en una bandeja grande para que sequen al aire y se utilicen durante la sesión de laboratorio de la siguiente semana.
4. Para este informe de laboratorio cada grupo deberá, el día siguiente al trabajo en terreno, colocar sobre el tablero en el laboratorio de suelos el perfil y localización de su agujero, y cada estudiante usará estos datos para dibujar un perfil de suelos utilizando una escala de 2 cm = 1 m vertical y 2 cm = 15 m horizontal sobre una hoja de 21.5 X 28 cm. Deberá hacerse una descripción visual del suelo en cada estrato (por ejemplo, arcilla arenosa, gris; capa vegetal negra, arena gravosa). Cada estudiante deberá así mismo presentar un dibujo de la variación del contenido de humedad con la profundidad como se muestra en la Fig. 2-1. Se debe utilizar una leyenda similar a la que se muestra en la figura.

¿Será posible, en el breve informe de esta práctica, exponer algunas conclusiones sobre la variación del contenido de humedad con la profundidad —especialmente si han ocurrido lluvias recientes en la zona?



(a) Perfil del suelo obtenido a partir de la información de las perforaciones.

- Relleno y capa vegetal
- Arena gris
- Arcilla ilmosa parda
- Arcilla gravosa parda
- Arena y grava parda clara



(b) Variación del contenido de humedad con la profundidad en la perforación No. 4.

Figura 2-1.

Presentación típica de registro de perforación. Nótese la forma de dibujar el perfil de la superficie del suelo. Algunas personas (Experimento No. 2) usan como referencia la superficie del suelo en el sitio de cada perforación. Estos detalles varían de laboratorio a laboratorio. Todas las dimensiones en metros.

Experimento N° 3

LIMITES LIQUIDO Y PLASTICO DE UN SUELO

Referencias

AASHTO T89-68 y T90-70

ASTM 423-66 (Límite líquido) y D424-59 (Límite Plástico)

ASTM (1960), Artículos sobre Suelos: Simposio sobre los Límites de Atterberg, *Publicación Técnica Especial (STP) No. 254*, pp. 159-226 (con numerosas referencias).

Casagrande, A. (1932), Investigación sobre los Límites de Atterberg de los Suelos, *Public Roads*, Vol. 13, No. 8, Octubre, pp. 121-136.

Fang, H. Y., (1960), Determinación Rápida del Límite Líquido de Suelos por el Método del Índice de Flujo, *Highway Research Board Bulletin No. 254*, pp. 30-35 (contiene también referencias anteriores).

Nuyens, J. G. E., y R. F. Kockaerts (1967), Técnica Confiable para Determinar el Límite Plástico, *Material Res. Stand.*, ASTM, Vol. 7, No. 7, julio, pp. 295-299 (ver también Diciembre, 1968, pp. 17-19).

Seed, H. B., R. J. Woodward Jr., y R. Lundgren, (1964), Aspectos fundamentales de los Límites de Atterberg, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, SMG*, Noviembre, pp. 75-105, (ver también *SM 4*, Julio, pp. 107-131, de los mismos autores).

Objetivos

Introducir al estudiante al procedimiento de determinación de los límites líquido y plástico de un suelo.

Equipo¹

Recipiente para hacer el ensayo del límite líquido con herramienta para hacer la ranura (Fig. 3-1).

Recipientes para contenido de humedad.

Placa de vidrio para hacer el límite plástico (opcional).

Figura 3-1

Equipo corriente para los ensayos de límites líquido y plástico. Se aprecia lo siguiente: tamiz No. 40 y bandeja; aparato de límite líquido con herramientas para hacer la ranura de tipo Casagrande y ASTM (a la derecha); botella de plástico blando para proveer cantidades controladas de agua; plato evaporador de porcelana y espátula para mezcla cuidadosa del suelo; placa de vidrio para hacer el ensayo de límite plástico y varilla de soldadura de 3 mm para visualizar por comparación el diámetro del cilindro para límite plástico (opcional).



¹ Hacer pasar por un tamiz de 10 mm una muestra de tierra del depósito del laboratorio y luego depositarla en una caneca de 20 gal. La muestra debe obtenerse antes de empezar el curso; y debe haber suficiente para que el laboratorio realice los experimentos números 3, 6, 7 y parte de 8, 9 y 14. Una pequeña porción debe ser secada al aire varios días antes de realizar el experimento 3, dejando suficiente muestra para los números 6 y 7.

Equipo para preparación de la muestra de suelo (recipiente de porcelana, espátula, botellas plástica para añadir cantidades controladas de agua).

Balanza con sensibilidad de 0.01 gm.

Tamiz recipiente y tapa (US No. 40, BS No. 36, AFNOR No. 27, o DIN No. 400; ver Tabla 5-1).

Exposición general

Los límites líquido y plástico son sólo dos de los 5 "límites" propuestos por A. Atterberg, un científico sueco dedicado a la agricultura (ca. 1911). Estos límites son:

1. *Límite de cohesión*. Es el contenido de humedad con el cual las boronas de suelo son capaces de pegarse una a otras.
2. *Límite de pegajosidad*. Es el contenido de humedad con el cual el suelo comienza a pegarse a las superficies metálicas tales como la cuchilla de la espátula. Esta condición tiene importancia práctica para el ingeniero agrícola pues se relaciona con la capacidad del suelo para adherirse a las cuchillas o discos del arado cuando se cultiva un suelo.
3. *Límite de contracción*. Es el contenido de humedad por debajo del cual no se produce reducción adicional de volumen o contracción en el suelo. El método para determinar este contenido de humedad se presenta en el Experimento No. 4.
4. *Límite plástico*. Es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico.
5. *Límite líquido*. Es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

Los límites líquido y plástico han sido ampliamente utilizados en todas las regiones del mundo, principalmente con objetivos de identificación y clasificación de suelos. El límite de contracción ha sido útil en varias áreas geográficas donde el suelo sufre grandes cambios de volumen entre su estado seco y su estado húmedo. El problema de potencial de volumen puede muy a menudo ser detectado de los resultados de los ensayos de límite líquido y límite plástico. El límite líquido en ocasiones puede utilizarse para estimar asentamientos en problemas de consolidación (Experimento No. 13) y ambos límites son algunas veces útiles para predecir la máxima densidad en estudios de compactación (Experimento No. 9). Los dos métodos de clasificación presentados en el Experimento No. 8 incorporan el uso del límite líquido y el límite plástico.

Los límites de cohesión y pegajosidad por el contrario han sido muy poco utilizados universalmente. En efecto solo muy recientemente se ha popularizado el conocimiento de que fueron 5 y no 3 los límites de plasticidad propuestos por Atterberg.

La localización relativa de los límites de contracción w_s , plástico w_p , y líquido w_L , se muestran sobre una escala de humedad en la Fig. 3-2.

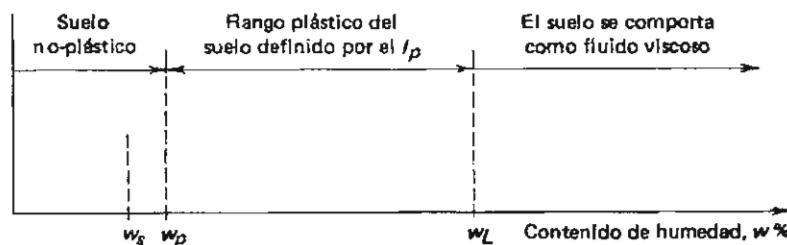


Figura 3-2

Localización relativa de los límites de contracción, plástico y líquido sobre la escala de contenido de humedad. Nótese que la localización de w_s puede llegar en algunos suelos a estar a la derecha de w_p .

Para poder establecer valores definidos, reproducibles, de estos límites, se propuso que el límite líquido se definiera arbitrariamente como el contenido de humedad al cual una masa de suelo húmedo colocada en un recipiente en forma de cápsula de bronce, sepa-

rada en dos por la acción de una herramienta para hacer una ranura-patrón, y dejada caer desde una altura de 1 cm, sufra después de dejarla caer 25 veces una falla o cierre de la ranura en una longitud de 12.7 mm. Algunas variables afectan el resultado de la prueba del límite líquido o el número de golpes requeridos para cerrar la ranura-patrón en una longitud de 12.7 mm entre los cuales se cuentan:

1. Tamaño de la masa de suelo contenido en la cápsula de cobre (espesor y cantidad).
2. Velocidad a la cual se le dan los golpes (debería ser 120 revoluciones por minuto).
3. Tiempo de reposo del suelo en la cazuela antes de comenzar la cuenta de golpes y estado de limpieza de la cazuela antes de colocar la pasta de suelo para el ensayo.
4. Humedad del laboratorio y rapidez con la cual se hace el ensayo.
5. Tipo de material utilizado como base del aparato o sea superficie contra la cual se debe golpear la cazuela (comúnmente se utiliza caucho duro o *micarta*).
6. Ajuste o calibración de la altura de caída de la cazuela (debe ser exactamente 1 cm).
7. Tipo de herramienta utilizada para hacer la ranura (bien la recomendada por la ASTM o la llamada tipo Casagrande).
8. Condición general del aparato del límite líquido (pasadores desgastados, conexiones que no estén firmemente apretadas).

Las variables anteriores pueden ser todas controladas por el operador. El límite líquido (w_L) es también afectado marcadamente por el tipo de suelos y otros factores adicionales. Para intentar reducir estas variables en el ensayo, se han desarrollado y se utilizan aparatos patrón así como herramientas patrón para hacer la ranura. Una de las herramientas para hacer la ranura (Fig. 4-4b) es la propuesta por la ASTM; la otra herramienta patrón fue desarrollada por Casagrande (1932) la cual se muestra en la misma figura, y tiene la ventaja de permitir un mejor control de la profundidad de la pasta de suelos en la cazuela. La herramienta de la ASTM es mejor para suelos con bajo límite líquido, en los cuales es generalmente difícil hacer la ranura, como materiales arenosos y limosos. Para estos suelos, sería incluso necesario formar parcialmente la ranura con la ayuda de la espátula, después de lo cual la ranura puede ser mejorada adecuadamente utilizando cualquiera de los ranuradores-patrón.

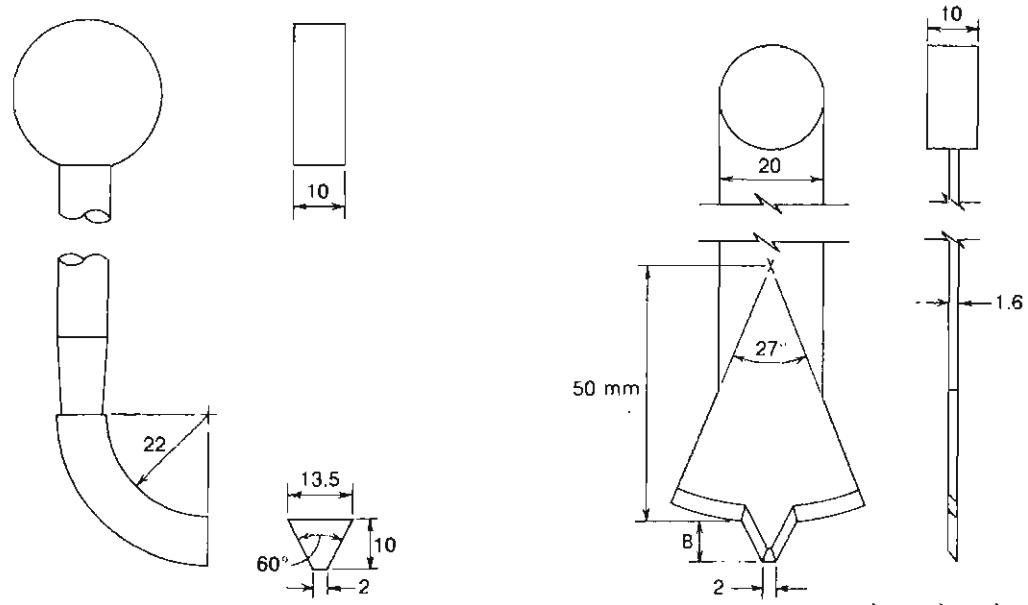
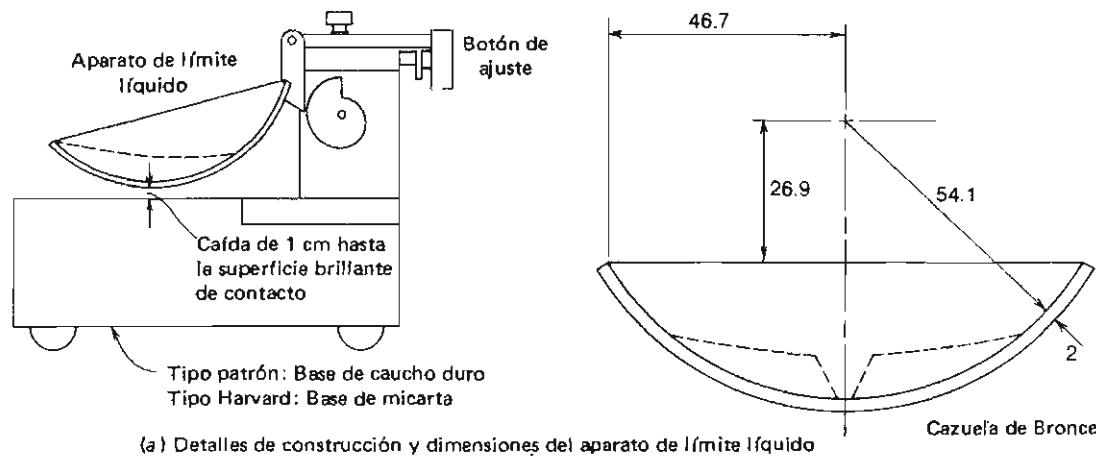
Para controlar la velocidad de golpeado del recipiente, se debe rotar la manivela a una velocidad aproximada de 120 rpm o sea a una tasa de 120 golpes por minuto.

La norma ASTM para esta prueba estipula el uso de agua destilada para la preparación de la muestra. Sin embargo, la mayoría de los laboratorios utilizan agua común con resultados satisfactorios.

Los ensayos de límites de Atterberg deben hacerse sobre suelos tamizados a través de la malla No. 40. Comúnmente, el suelo traído del campo se encuentra en un estado de humedad demasiado alto para pasar a través de la malla No. 40. Es entonces permisible (y sugerido por la norma ASTM D421-58, "Preparación Seca de Muestras de Suelo para Análisis Granulométrico y Determinación de Constantes de Suelo") secar al aire el suelo para obtener la fracción de suelos que pasa el tamiz No. 40 (0.425 mm) en la mayoría de los casos. El secar al horno la muestra de suelo para preparar el material que debe tamizarse a través de la malla No. 40, disminuye generalmente el valor registrado en pruebas de límite líquido y plástico y por consiguiente, deben evitarse como procedimiento. Investigaciones hechas por el autor al igual que otras reportadas por Casagrande (1932) han demostrado que ordinariamente el secar al aire el suelo como preparación de la muestra disminuye el límite líquido entre el 2 y el 6% de su valor real. Para evitar este problema, se recomienda, cuando sea posible, utilizar para el ensayo el material que parezca pasar por el tamiz No. 40, de acuerdo con una inspección visual y comenzar el ensayo con este material en su contenido de humedad natural. Las investigaciones indican también que la mayoría de los suelos secados al aire recuperan sus límites originales si se le permite, luego de mezclarlos con agua, un tiempo de curado de 24 a 48 h, antes de hacer el ensayo.

Previamente se estableció que el límite líquido se define para el contenido de humedad a la cual es necesario dar 25 golpes a la cazuela para cerrar en una longitud de 12.7 mm la ranura

hecha con la herramienta patrón. Sería realmente fortuito el poder encontrar este contenido de humedad exacto dentro de un tiempo razonable. Como la mayoría de los casos esto es cercano a lo imposible, es necesario recurrir a otros caminos para encontrar este valor de humedad tan particular. Se ha encontrado que si uno hace una gráfica en la cual se represente la variación del número de golpes necesario para cerrar la ranura en una escala logarítmica contra el contenido de humedad correspondiente en una escala aritmética, el lugar geométrico de los puntos resultantes insinúa una variación de comportamiento de tipo lineal. Con este fenómeno establecido, se vuelve relativamente sencillo establecer el contenido de humedad en el límite líquido de una forma indirecta. Solo es necesario obtener entre 3 y 6 puntos a diferentes contenidos de humedad, conjuntamente con el número de golpes necesario para cerrar la ranura correspondiente (obviamente, distribuídos a ambos lados del conteo de 25 golpes necesario para definir el límite líquido), colocar estos datos en un diagrama semilogarítmico, y establecer la proyección lineal insinuada por dicho punto para el contenido de humedad correspondiente a una cuenta de 25 golpes (límite líquido de suelo). Parece que dicha relación lineal solamente se mantiene cierta a lo largo de un ciclo en un gráfico semilogarítmico (entre 10 y 100 golpes). Es evidente que mientras más cercano alrededor de la cuenta de 25 se encuentre el intervalo de puntos experimentales, mayor será la confiabilidad del valor extrapolado de la tendencia observada experimentalmente.



(b) Herramientas ranuradoras

Figura 3-3

Equipo para la prueba de límite líquido. Todas las dimensiones en milímetros.

Un término que indique:

1. El porcentaje de arcilla en la fracción de suelo inferior en tamaño al tamiz No. 40 como se utiliza para los ensayos de límites de Atterberg y
2. El potencial de expansión y contracción (cambios de volumen) de un suelo, con valores grandes que indiquen un alto potencial

es llamado la *actividad* de un suelo. La *actividad* de un suelo se define como:

$$A = \frac{\text{índice de plasticidad}}{\text{porcentaje de arcilla en la mezcla} - C_o} \quad (3-1)$$

La constante C_o vale 0 ó 9, dependiendo de cuál recomendación se utilice, la del trabajo de Skempton o la del trabajo de Seed y otros (1964). El índice de plasticidad se define en la Fig. 3-1. El porcentaje de arcilla en la mezcla (de la fracción menor que tamiz No. 40) utilizada en la ecuación anterior se basa en el porcentaje de grano del suelo menores de 0.002 mm, el cual no es universalmente aceptado como el límite superior de tamaño de minerales de arcilla.

A valores pequeños de A en la ec. (3-1) corresponden valores menores del potencial de cambio de volumen del suelo. El rango aproximado de A varía entre 0.3 y cerca de 5.5 y depende del tipo de minerales de arcilla presentes en el suelo; e.g., una arcilla predominantemente caolinítica tiene una actividad menor que una arcilla con alto contenido de ilitas o con montmorillonitas.

El límite líquido es una medida de la resistencia al corte del suelo a un determinado contenido de humedad. El límite líquido es análogo a un ensayo de resistencia, y Casagrande (1932) encontró que cada golpe necesario para cerrar el surco en la cazuela corresponde a un esfuerzo cortante cercano a un g por cm^2 . Otros han obtenido resultados similares de forma que se puede decir que el límite líquido representa para todos los suelos un valor de resistencia al corte entre 20 y 25 g $\times \text{cm}^2$. Otra observación fundamental de las investigaciones hechas consiste en que el límite líquido aumenta a medida de que el tamaño de los granos o partículas presentes en la muestra disminuyen.

Además de ser el límite inferior del rango de comportamiento plástico de un suelo, el límite plástico tiende a incrementar en valor numérico a medida que disminuye el tamaño de las partículas presentes en la muestra. Si en dos suelos se encuentra presente el mismo tipo de partículas según tamaño, será mayor el límite líquido en aquel que tenga más partículas dentro de un mismo rango. El límite plástico es también una medida de la resistencia al corte del suelo.

La investigación de Seed y otros (1964) demostró también que la línea A de Casagrande utilizada en el diagrama de clasificación que se muestra en la Fig. 8-2 es esencialmente correcta. Casagrande propuso este diagrama basado en el análisis de un gran número de valores obtenidos sobre arcillas de diferentes sitios del mundo en los comienzos de la década de 1940. Hoy en día cuando se ha determinado que tanto el límite líquido como el límite plástico dependen del porcentaje de arcilla presente en la fracción que pasa a través del tamiz No. 40 del suelo, es posible escribir la siguiente relación lineal para el límite líquido:

$$w_L = K(PC - a) \quad (3-2)$$

Escribiendo nuevamente la ec. (3-1), obtenemos $I_p = A (PC - C_o)$

donde PC = porcentaje de partículas de tamaño de arcilla (menores de 0.002 mm) en la fracción de suelo que pasa el tamiz No. 40.

K, a = constantes que deben ser determinadas para cada suelo.

Si se elimina PC en la ecuación anterior y se sustituyen nuevas constantes, se obtiene

$$I_p = N(w_L - b) \quad (3-3)$$

La carta de plasticidad de Casagrande utiliza $N = 0.73$ y $b = 20$.

Como el gráfico semilogarítmico de contenido de humedad contra logaritmo del número de golpes es una línea recta, la ecuación de esta línea se puede representar en la forma general

$$w = -F_i \log N + C \quad (3-4)$$

donde w = contenido de humedad a N golpes

F_i = índice de flujo, o sea el cambio en contenido de humedad Δw sobre un ciclo

del gráfico semilogarítmico ($w_N = 10 - w_{N=100}$); también, $F_i = \frac{\Delta w}{\log N_2/N_1}$

N = número de golpes al contenido de humedad w

C = constante para ser determinada en cada suelo

La resistencia al corte de un suelo en su límite plástico es una medida de la tenacidad de la arcilla; la resistencia al corte de todos los suelos en el límite líquido es una constante (o muy cercanamente). Por tanto, se puede usar la ec. (3-4) como un criterio para aproximar las magnitudes relativas de la resistencia al corte del suelo o de diferentes tipos de suelos en el límite plástico. Por ejemplo, para dos suelos de índice de plasticidad I_p idéntico pero diferentes índices de flujo F_i , si ambos suelos se someten al mismo cambio en contenido de humedad desde el límite líquido, el suelo que tenga una curva o línea de flujo más pendiente (mayor F_i) requerirá el menor número de golpes para cerrar la ranura patrón y por consiguiente, tendrá menor resistencia al corte en este contenido de humedad.

Como el hacer un gran número de ensayos de límite líquido puede tomar una gran cantidad de tiempo, la Estación Experimental de Hidrovías (Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss), en su Memorando Técnico No. 3-286 de junio de 1949, concluyó sobre el análisis de 767 ensayos, que el límite líquido puede establecerse a partir de un solo ensayo utilizando la ecuación:¹

$$w_L = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \beta} \quad (3-5)$$

donde w_N = contenido de humedad al número de golpes N obtenido en el ensayo.

β = pendiente de la recta característica en el gráfico semilogarítmico w vs. $\log N$.

Para esta serie de valores de límite líquido, se encontró que $\tan \beta = 0.121$ resultó una buena aproximación, de donde se puede expresar la anterior ecuación como:

$$w_L = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad (3-6)$$

El valor de $\tan \beta$ no es 0.121 para todos los suelos; sin embargo, se puede generalmente obtener buenos resultados a partir de esta ecuación, si el contenido de humedad w_N utilizado en la fórmula se determina para un número N de golpes entre 20 y 30. Lo anterior puede explicarse debido a que en un rango tan pequeño de la curva de flujo el cambio en movimiento vertical (contenido de humedad) es pequeño aún para curvas muy pendientes.

El límite plástico se ha definido arbitrariamente como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro se rompe o se resquebraja, cuando se enrolla a un diámetro de 3 mm o aproximadamente 3 mm (referirse a la Fig. 3-4). Esta prueba es bastante más subjetiva (dependiente del operador) que el ensayo del límite líquido pues la definición del resquebrajamiento del cilindro de suelo así como del diámetro de 3 mm están sujetas a la interpretación del operador. El diámetro puede establecerse durante el ensayo por comparación con un alambre común o de soldadura del mismo diámetro. Con la práctica, se encuentra que los valores del límite plástico pueden reproducirse sobre el mismo suelo por parte de diferentes laboratoristas dentro de un rango del 1 al 3%.

¹ Ver Fang (1960). El departamento de Carreteras de Washington trabajando independientemente, llegó a una ecuación similar en la misma época.

Procedimiento *Esta será una práctica individual*

A. LIMITE LIQUIDO (*referirse a la Fig. 3-4*)

1. Cada miembro del grupo debe pulverizar una cantidad suficiente de suelo secado al aire (de una muestra de 5 kg puesta a secar al aire la semana anterior a la ejecución del ensayo), para obtener una muestra representativa del material que pasa a través del tamiz No. 40 de alrededor de 250 ± 10 g. Es necesario asegurarse de botar el remanente retenido en el tamiz pues no es representativo del suelo que se trajo del terreno. Además se debe asegurar, mediante el uso de un mortero, la destrucción de todos los grumos presentes; una de las principales fuentes de error del ensayo consiste en fallar en la obtención de una muestra realmente representativa, al permitir que muchos "finos" se queden retenidos en forma de grumos en el tamiz No. 40.

No es conveniente secar el suelo al horno para pasarlo a través del tamiz No. 40 pues esta práctica reduce el valor real de los límites líquidos y plástico del suelo.

No es necesario saturar y curar la muestra antes de la práctica en beneficio del tiempo de trabajo disponible en clases de laboratorio.

2. A continuación cada grupo debe verificar que la altura de la máquina del límite líquido que va a utilizar sea exactamente de 1 cm (± 0.1 mm). Para esta operación se puede utilizar la cabeza en forma de dado de 1 cm en el extremo superior del ranurador-patrón. Hacer la calibración con respecto a la marca de desgaste que se nota en la parte inferior de la cazuela, y no con respecto a la mínima distancia. Si la altura de la caída no se calibra dentro de estos límites, es posible introducir un error de varias unidades % en la determinación del contenido de humedad. Si la máquina se encuentra en condiciones inadecuadas o tiene un gran desajuste debe verificarse con el instructor para las reparaciones o cambios de partes correspondientes.
3. Colocar los 250 g de suelo en un recipiente de porcelana, añadir una pequeña cantidad de agua y mezclar cuidadosamente el suelo hasta obtener un color uniforme (*referirse a la Fig. 3-4a*). Una mezcla pobre del conjunto suelo-agua es generalmente causa adicional de error en el ensayo. Cuando el color es uniforme en toda la mezcla y ésta adquiere una apariencia cremosa, su estado es adecuado en general. Se debe continuar añadiendo pequeñas cantidades adicionales de agua y mezclando cada vez hasta obtener una mezcla homogénea. Cuando se encuentre el suelo en un punto de consistencia (pegajosidad) tal que se pueda estimar (o simplemente hacer un ensayo de prueba) que tomará alrededor de 50 golpes para cerrar en una longitud de 12.7 mm la ranura, remover alrededor de 20 g de esta muestra adecuadamente mezclada del plato en el que se está trabajando para determinación posterior del límite plástico. A continuación se debe añadir un poco más de agua de manera que la consistencia resultante permita un número de golpes para la falla en el rango de 30 a 40.
4. Remover la cazuela de bronce del aparato de límite líquido y colocar dentro de la cazuela una pequeña cantidad de suelo hasta la profundidad adecuada para el trabajo de la herramienta ranuradora, bien centrada en la cazuela con respecto al pasador y de una forma similar a la mostrada en la Fig. 3-4b. A continuación se debe emparejar la superficie de la pasta de suelo cuidadosamente con una espátula, y mediante el uso de la herramienta ranuradora, cortar una ranura clara, recta, que separe completamente la masa de suelo en dos partes. La mayor profundidad del suelo en la pasta deberá ser aproximadamente igual a la altura de la cabeza de la herramienta patrón de la ASTM (Fig. 3-3b). Si se utiliza la herramienta de Casagrande, se debe mantener firmemente perpendicular a la tangente instantánea a la superficie de la cazuela y la herramienta, de forma que la profundidad de la ranura sea homogénea en toda su longitud (Fig. 3-4c). El suelo no debe prácticamente ser alterado por los "hombros" de la herramienta.

Después de hacer la ranura, se debe retomar rápidamente la cazuela a su sitio del aparato y hacer el conteo de golpes. Si se permite una demora innecesaria en este proceso, y la humedad ambiental del laboratorio es baja se puede secar la superficie de la muestra, lo cual afectará el conteo de golpes. Este efecto mostrará cuando se dibujen

Figura 3-4

Pasos en el ensayo de límite líquido:

- (a) Suelo cuidadosamente mezclado. Nótese la textura uniforme, cremosa.
- (b) Suelo colocado en la cazuela para el ensayo de límite líquido. Nótese que la cazuela no se llena al tope, solo su parte frontal.
- (c) Pasta de suelo con la ranura hecha utilizando la herramienta de Casagrande. La profundidad es la que resulta de simplemente apoyar la herramienta en el fondo de la pasta de suelo al hacer la ranura.
- (d) La ranura se cierra 12.7 mm (se usa una escala para comparación numérica visual en la fotografía) mientras la manivela se gira a 120 r.p.m. y se cuentan los golpes necesarios de la cazuela sobre la base del aparato de límite líquido para lograrlo.
- (e) Muestra para contenido de humedad tomada de la zona de cierre de la ranura. Nótese que se toma en el recipiente de humedad una can-

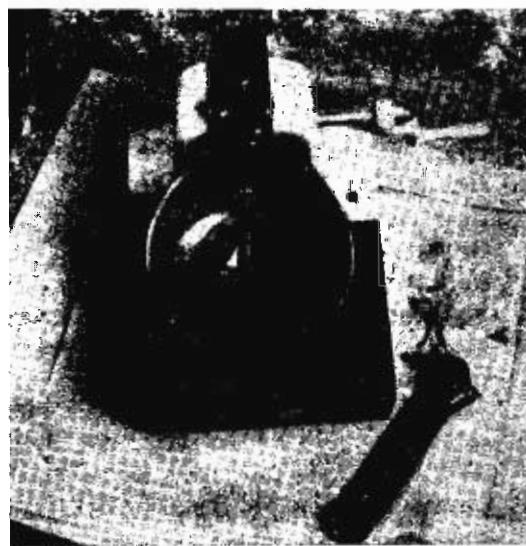
tidad de aproximadamente 45 g. En todo caso, se debe tomar de esta zona de la pasta una muestra de, mínimo, 40 g para contenido de humedad.



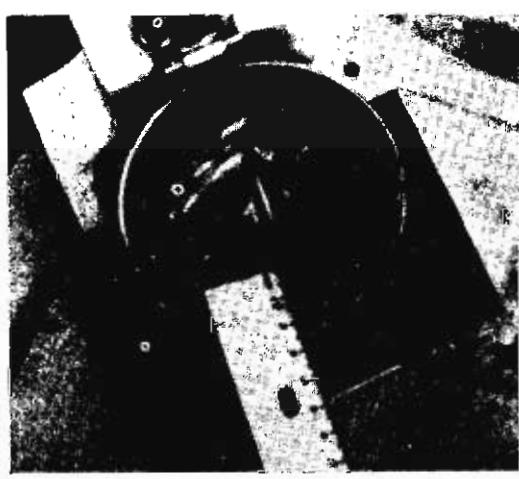
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

los datos una tendencia errática de los puntos en el plano. Otro tipo de errores sin embargo, también pueden producir este tipo de comportamiento.

5. Tomar una muestra para medir contenido de humedad (tan grande como sea posible y cercana a los 40 g) y colocarla en una lata o recipiente para humedad cuyo peso debió determinarse con anterioridad, y asegurarse que esta muestra corresponde a la zona donde se cerró la ranura (refiérase a la Fig. 3-4e). Colocar la tapa del recipiente para contenido de humedad y colocarlo a un lado temporalmente. Remover los restos de suelo de la cazuela y volverlos al recipiente donde se había preparado la muestra. Lavar y limpiar perfectamente la cazuela.

Añadir una pequeña cantidad de agua al recipiente de porcelana de preparación de suelo y mezclar cuidadosamente hasta obtener una coloración homogénea y consistencia para obtener un número de golpes entre 25 y 30 aproximadamente. Repetir los pasos 4 y 5 anteriores.

6. Repetir la secuencia para dos ensayos adicionales con número de golpes entre 20 y 25 y entre 15 y 20, respectivamente para un total de cuatro determinaciones en el ensayo.

Es necesario que la diferencia entre el número de golpes en cada ensayo individual sea de por lo menos dos y preferiblemente tres para obtener una dispersión adecuada en el gráfico y ojalá una medición en la cual el número de golpes sea muy cercano a 25 golpes. Es preciso asegurarse de limpiar perfectamente la cazuela de bronce después de cada ensayo y secarla cuidadosamente.

Además es también necesario asegurarse de tener cerca del mismo lapso de tiempo para cada ensayo de forma que se elimine el efecto de la humedad del laboratorio como una variable.

No es aconsejable dejar la muestra de suelo en la cazuela de bronce por un período de tiempo muy largo. Esto podría permitir el desarrollo de adhesión entre el suelo y la cazuela.

7. Pesar las cuatro muestras de humedad obtenidas en los diferentes ensayos, remover las tapas, y colocar los recipientes en un horno a 110°C para que se seque durante la noche.

Es evidente que el método antes descrito garantiza una mejor mezcla del suelo. Es bastante más fácil agregar agua a una muestra de suelo y homogenizar que agregar suelo seco a una masa que ya se encuentra mojada y que deba ser secada para obtener un conteo de golpes en el ensayo en la parte secada o sea superior a 25 golpes. Es difícil para el novato predecir el número de golpes que deben proporcionarse a un suelo a partir de una inspección visual, pero si él tiene ya un dato sobre el número de golpes por ejemplo, 35 y se le añade a continuación agua es razonable esperar que el siguiente ensayo tenga un conteo de golpes inferior a 35. Por otra parte, si la cuenta inicial es de 18, ¿cuánto suelo seco debería agregarle para subir el conteo a 22 ó 24? A humedades muy altas, el comportamiento de la pasta estará cercano al de un líquido viscoso.

B. LIMITE PLASTICO

El siguiente paso consiste en determinar el límite plástico del suelo. Para aumentar la precisión eliminando los errores de pesada, el ensayo se debe hacer de la siguiente forma:

1. Dividir en varios pedazos o porciones pequeñas la muestra de 20 a 30 g de suelo que se había separado con anterioridad durante la preparación de la muestra para límite líquido.
2. Enrollar el suelo con la mano extendida sobre una placa de vidrio o sobre un pedazo de papel colocado a su vez sobre una superficie lisa, con presión suficiente para moldearlo en forma de cilindro o hilo de diámetro uniforme por la acción de unos 80 a 90 golpes o movimientos de mano por minuto (un golpe = movimiento hacia adelante y hacia atrás). Cuando el diámetro del hilo o cilindro de suelo llegue a 3 mm ($\frac{1}{8}$ pulg) se debe romper en pequeños pedazos, y con ellos moldear nuevamente unas bolas o masas que a su vez vuelvan a enrollarse (Fig. 3-5). El proceso de hacer bolas o masas de suelo y enrollarlas debe continuarse alternativamente hasta cuando el hilo o cilindro de suelo se rompa bajo la presión de enrollamiento y no permita que se le enrolle adicionalmente.



Figura 3-5

Ensayo de límite plástico. Separar algo de suelo cuando el número de golpes está en el orden de 50 en el ensayo de límite líquido (intentos iniciales). Nótese el uso de una varilla de soldadura de 3 mm para comparación visual del diámetro del cilindro de suelo. Nótese que debe haber suelo suficiente para hacer varios intentos.

Si el cilindro se desmorona a un diámetro superior a 3 mm, esta condición es satisfactoria para definir el límite plástico si el cilindro se había enrollado con anterioridad hasta más o menos 3 mm. La falla del cilindro se puede definir de la siguiente forma:

- Simplemente por separación en pequeños pedazos.
- Por desprendimiento de escamas de forma tubular (cilindros huecos) de dentro hacia fuera del cilindro o hilo de suelo.
- Pedacitos sólidos en forma de barril de 6 a 8 mm de largo (para arcillas altamente plásticas).

Para producir la falla no es necesario reducir la velocidad de enrollado y/o la presión de la mano cuando se llega a 3 mm de diámetro. Los suelos de muy baja plasticidad son una excepción en este sentido, en estos casos la bola inicial debe ser del orden de 3 mm antes de empezar a enrollar con la mano.

- Esta secuencia debe repetirse el número de veces que se requiera para producir suficientes pedazos de cilindro que permitan llenar un recipiente de humedad.¹
- Pesar el recipiente cubierto, remover su tapa y colocarlo dentro del horno. Nótese que en efecto se han hecho varias determinaciones del límite plástico pero se han reducido el proceso de pesada y cálculos a un solo ensayo.

Cálculos

- Es necesario regresar al laboratorio al día siguiente y pesar todas las muestras secadas en el horno para poder calcular los contenidos de humedad correspondientes. Dibujar la gráfica de contenido de humedad contra número de golpes resultantes del ensayo de límite líquido en un papel semilogarítmico o en un formato igual o similar al recomendado en este manual con el fin de obtener el valor del límite líquido como se insinúa en la Fig. 3-6. Calcular el índice de flujo F_i y mostrar los datos registrados durante el ensayo.

Calcular además el límite plástico y el índice de plasticidad como

$$I_p = w_L - w_P \quad (3-7)$$

- Utilizar la Ec. (3-6) para calcular el límite líquido para cada valor N y w_N registrado; incluya esta información en su "presentación general" y haga una comparación con el límite líquido obtenido del gráfico semilogarítmico.
- Calcular la actividad del suelo utilizando el porcentaje de material más fino que el diámetro 0.002 mm tomado del análisis hidrométrico respectivo, si el Exp. No. 5 se ha hecho en paralelo con este experimento. Cuando se use la ec. (3-1) para este cálculo se recomienda utilizar $C_o = 9$.
- En la "Discusión" de su informe mencione seis usos diferentes para los datos obtenidos en el ensayo o sea límite líquido y límite plástico.

¹ Algunos laboratoristas prefieren utilizar recipientes de humedad separados para cada determinación de límite plástico. Sin embargo, los errores de pesada tienden a dañar la reproducibilidad del ensayo y el método que se sugiere aquí es preferido por el autor.

DETERMINACION DE LIMITES DE ATTERBERG

Formato 3

Proyecto EXP. N° 3

Trabajo No. ~

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY

Perforación No. ~

Muestra No. ~

Descripción del Suelo ARCILLA LIMOSA PARDIA

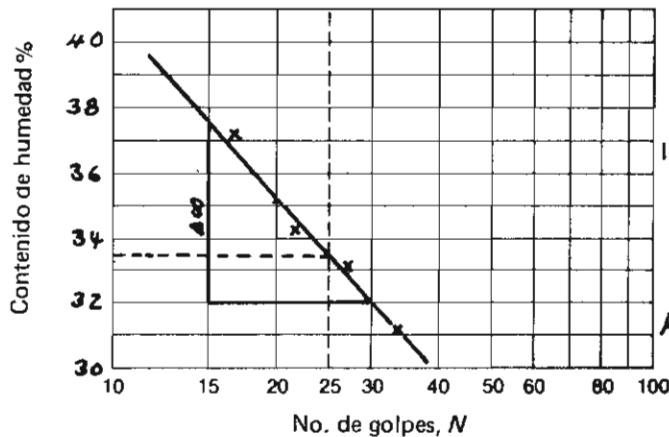
Profundidad de la Muestra ~

Realizada por J.E.B.

Fecha 5-4-76

Determinación del Límite Líquido

Lata	27	28	31	34	
Peso de suelo húmedo + lata	48.61	55.53	51.71	50.51	
Peso de suelo seco + lata	41.19	46.05	42.98	41.54	
Peso de lata	17.33	17.41	17.45	17.36	
Peso de suelo seco	23.86	28.64	25.53	24.18	
Peso de agua	7.42	9.48	8.73	8.97	
Contenido de humedad%	31.1	33.1	34.2	37.1	
Número de golpes, N	34	27	22	17	

Indice de Flujo $F_i = -17.8$

Límite Líquido = 33.5%

Límite Plástico = 19.4%

Indice de Plasticidad $I_p = 14.1$

$$F_i = \frac{\Delta \omega}{\log N_e/N_i} = \frac{32 - 37.6}{\log 31/17} = -17.8$$

Determinación del Límite Plástico

Lata No.	35	37	
Peso de suelo húmedo + lata	23.26	23.03	
Peso de suelo seco + lata	22.84	22.64	
Peso de lata	20.63	20.66	
Peso de suelo seco	2.21	1.98	
Peso de agua	0.42	0.39	
Contenido de humedad%	19.1%	19.6	

Figura 3-6

Juego de datos típicos para ensayos de límites líquido y plástico.

Experimento N° 4

LIMITE DE CONTRACCION

Referencias

ASHTO T92-68

ASTM D427-61

Chen, F. H., (1975), "Foundations on Expansive Soils", Elsevier Publishing Co., Amsterdam. (Contiene numerosas referencias recientes).

Holtz, W. G., y H. J. Gibbs (1956), Engineering Properties of Expansive Soils, *Transactions, ASCE*, Vol. 121, pp. 641-667.

Seed, H. B., R. J. Woodward, Jr., y R. Lundgren (1962), Prediction of Swelling Potential of Compacted Clags, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, SM 3*, junio, pp. 53-87.

Objetivo

Obtener el contenido de humedad por debajo del cual no se presenta cambio adicional en el volumen de una masa de suelo y obtener una indicación cuantitativa del cambio total que puede ocurrir.

Equipo

Cápsula de contracción (refiérase a la Fig. 4-1)

Placa de vidrio con tres apoyos

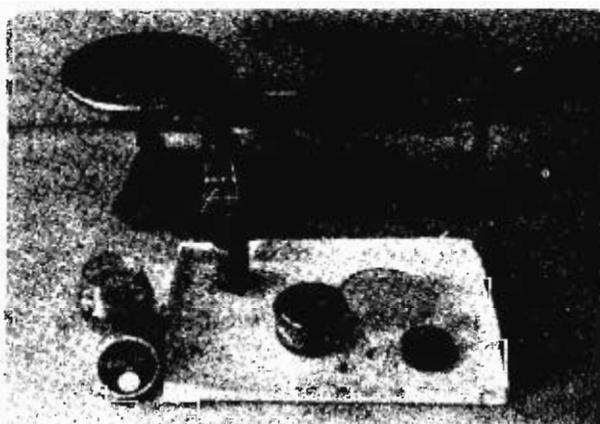
Recipiente volumétrico y placa plana

Mercurio metálico

Balanza con sensibilidad a 0.1 g

Figura 4-1

Equipo para límite de contracción. Balanza de 0.1 g de sensibilidad (estimación al 0.01 g); cápsula de contracción de metal monel; recipiente volumétrico de vidrio (lleno de mercurio metálico); placa plana circular de vidrio para nivelar el mercurio en el recipiente volumétrico; placa de vidrio con tres apoyos (metal monel) usado para sumergir la galleta de suelo seco dentro del recipiente volumétrico; recipiente del mercurio metálico; vaselina de petróleo para lubricar el recipiente volumétrico y evitar que la galleta de suelo se fracture. Nótese el uso de una caja de cartón hecha a mano para recoger el mercurio derramado al envasar el recipiente volumétrico. El tamaño es suficiente para facilitar la toma de medidas.



Exposición General

Ver Experimento No. 3.

Los suelos susceptibles de sufrir grandes cambios de volumen cuando se someten a cambios en su contenido de humedad, son problemáticos si se usan para rellenos en

carreteras o ferrocarriles, o si se utilizan para la fundación de elementos estructurales. Los cambios de volumen pueden motivar ondulaciones en las carreteras y grietas en las estructuras debido a que los cambios de volumen usualmente no son uniformes.

Los límites líquido y plástico pueden utilizarse para predecir la presencia potencial de problemas en suelos debido a su capacidad de cambio de volumen. Sin embargo, para obtener una indicación cuantitativa de cuánto cambio en humedad puede presentarse antes de que se presente un apreciable cambio volumétrico y obtener, si dicho cambio volumétrico ocurre, una indicación de la cantidad de ese cambio, es necesario hacer un ensayo del límite de contracción.

La práctica se comienza con un volumen de suelo en condición de saturación completa, preferiblemente (pero no absolutamente necesario) a un contenido de humedad cercano o superior al límite líquido. El suelo se deja entonces secar. Durante el secado se supone que bajo cierto valor límite de contenido de humedad, cualquier pérdida de humedad en el proceso está acompañada por una disminución en el volumen global de la muestra (o relación de vacíos). A partir de este valor límite en el contenido de humedad, no es posible producir cambios adicionales en el volumen del suelo por pérdida adicional de agua de poros. Este valor inferior limitante en el contenido de humedad se denomina *límite de contracción*.

Lo anterior significa físicamente que no se causará ningún volumen adicional por cambios subsecuentes en la humedad. Por encima del límite de contracción todos los cambios de humedad producen cambios de volumen en el suelo. Este cambio de volumen se puede expresar en términos de la relación de vacío y el contenido de humedad, como se muestra en la Fig. 4-2.

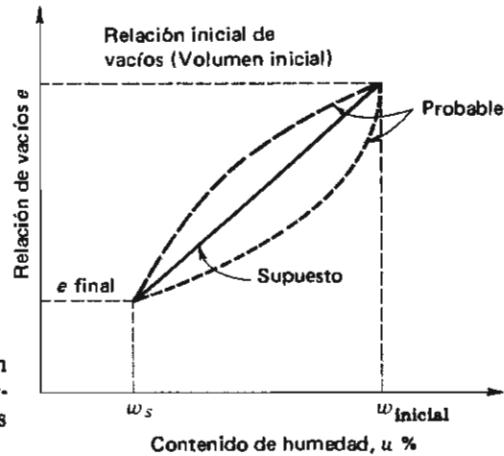


Figura 4-2

Gráfica cualitativa de contenido de humedad vs. relación de vacíos. Nótese que las líneas punteadas indican trayectorias probables de contracción, no lineales, comparadas con la línea gruesa supuesta.

La relación de contracción da una indicación de cuánto cambio de volumen puede presentarse por cambios de la humedad de los suelos. La relación de contracción se define como la relación del cambio de volumen del especímen o muestra de suelo como un porcentaje de su volumen seco al cambio correspondiente en humedad por encima del límite de contracción expresado como un porcentaje del peso seco del suelo obtenido luego de ser secado al horno. Esta definición da una relación de contracción SR como la gravedad específica *aparente* de la galleta de suelo:

$$SR = \frac{\Delta V/V_f}{\Delta w/W_s} = \frac{W_s}{\gamma_w V_f} \quad (4-1)$$

como $\Delta V = \Delta w/\gamma_w$

Los símbolos utilizados en la ecuación anterior se definen de la siguiente manera:

V_f = volumen del suelo seco (del esqueleto, no de los sólidos)

V_i = volumen inicial del suelo húmedo a un contenido de humedad w_i

ΔV = cambio en volumen del suelo

w_i = contenido de humedad inicial del suelo

w_s = contenido de humedad en el límite de contracción

Δw = cambio en contenido de humedad

γ_w = peso unitario del agua en unidades consistentes

W_s = peso de suelo seco

La contracción lineal puede calcularse a partir de la contracción volumétrica S_v , definida como sigue:

$$S_v = (w_i - w_s)SR \quad (4-2)$$

Es necesario suponer que la reducción en volumen de suelo es uniforme en todas las direcciones. La contracción lineal se apoya usualmente en el decrecimiento del volumen del suelo a medida que disminuye el contenido de humedad desde un contenido de humedad inicial (generalmente el valor inicial w_i) hasta el límite de contracción, y puede calcularse de la siguiente forma:

$$LS = [1 - \sqrt[3]{1.0/(S_v + 1.0)}] \times 100 \quad \text{por ciento} \quad (4-3)$$

La contracción volumétrica se expresa generalmente como una cantidad decimal en la ec. (4-3).

Algunas veces se obtiene la contracción lineal moldeando una barra de suelo en un molde rectangular de, por ejemplo, $25 \times 25 \times L$ (= 100 hasta 200 mm) usando la misma técnica que se utiliza para hacer la muestra en forma de galleta.¹ En este último caso, es posible calcular la contracción lineal como:

$$LS = \frac{L_o - L_f}{L_o}$$

donde L_o = longitud de la barra de suelo húmedo

L_f = longitud de la barra de suelo seca

Este método de utilizar una barra de suelo para determinar la contracción lineal no se considera generalmente muy apropiado.

Procedimiento

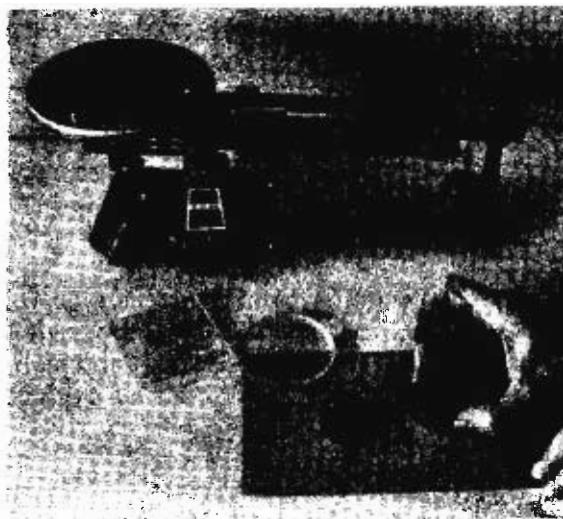
Esta es una práctica de grupo

NOTA: EVITAR EL CONTACTO DIRECTO DEL MERCURIO CON LA PIEL DEBIDO A QUE ES UNA SUBSTANCIA ALTAMENTE DAÑINA.

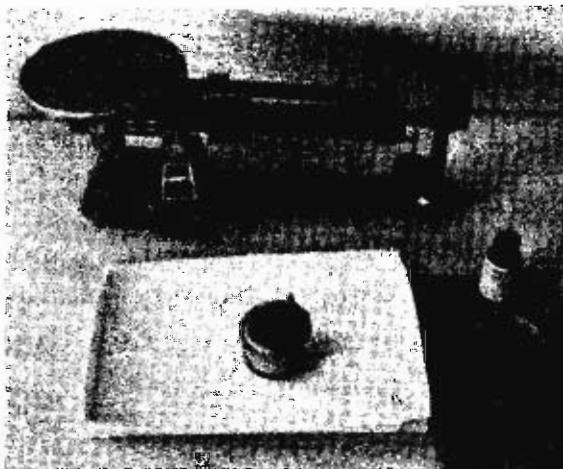
1. Tome alrededor de 40 g de suelo² de material *representativo*, del utilizado para las prácticas de límite líquido y plástico, que pase a través del tamiz No. 40, y mezclarlo cuidadosamente con agua común (o destilada) hasta lograr una pasta cremosa que pueda colocarse dentro del recipiente de contracción sin dejar ningún vacío. La consistencia del suelo debería obtenerse utilizando un contenido de humedad cercano o algo menor al límite líquido del suelo.
2. Recubrir ligeramente el interior de la cápsula o recipiente de contracción (ya sea de porcelana o de metal monel) con vaselina de petróleo, grasa de silicona, o atomizador con polvo de Teflón (substancia inerte) para prevenir que el suelo se adhiera al recipiente y/o se formen grietas durante el secado. Pese el recipiente y registre su peso.
3. Llenar el recipiente en tres capas colocando aproximadamente 1/3 de la cantidad de suelo seco necesaria para llenar el recipiente cada vez y darle golpes suaves sobre una base firme hasta que el suelo fluya dentro del recipiente y se note la ausencia total de burbujas

¹ Algunos departamentos de carreteras estatales usan este método para determinar la contracción lineal en lugar del método descrito específicamente para este experimento; la última norma AASHTO solamente se refiere a la muestra cilíndrica de tipo galleta sugerida en este experimento.

² En el Experimento No. 3 y en la Tabla 5-1 se presentan las designaciones correspondientes a los tamaños patrón de tamices fuera del territorio de los Estados Unidos.



(a)



(b)

Figura 4-3

Ensayo de límite de contracción.

- (a) Llenado del recipiente de contracción dando golpes secos sobre la mesa para remover las burbujas de aire. Nótese al lado una pastilla de suelo seco dentro de su respectivo recipiente de contracción.
- (b) Preparación de la determinación del volumen de la pastilla de suelos mediante el uso de la placa de vidrio con tres apoyos para sumergir la pastilla dentro de un recipiente volumétrico lleno de mercurio. Nótese que la pastilla flota sobre la superficie hasta cuando se le presiona hacia adentro. El recipiente volumétrico se coloca sobre una tapa hecha de cartulina o cartón para recoger el mercurio derramado. La balanza se utiliza para obtener los pesos antes y después del recipiente volumétrico.

de aire. Repetir la misma operación con la segunda y tercera capa. Al terminar se debe enrasar cuidadosamente el suelo dentro del recipiente utilizando una espátula de tamaño mediano, y a continuación pesar el recipiente con el suelo húmedo.

4. Secar al aire en el laboratorio la galleta hasta que su superficie cambie a un color muy claro (del orden de 6 a 8 horas). A continuación introduzca la muestra en un horno y mantenga la temperatura constante entre 105 y 110°C hasta obtener un peso constante (12 a 18 horas). Saque a continuación el recipiente con el suelo seco del horno y obtenga el peso de recipiente más suelo seco. El secado al aire de la muestra reduce la posibilidad de la formación de grandes grietas de contracción en el suelo debidos a la rápida pérdida de humedad y evita por otra parte la pérdida de suelo dentro del horno debido a la posibilidad de "ebullición" del suelo.
5. Encontrar el volumen del recipiente de contracción en cm^3 ; para esto es necesario, en primer lugar, llenar el recipiente de contracción con mercurio metálico hasta que se derrame ligeramente. A continuación se debe colocar el recipiente lleno sobre un vidrio pequeño tipo vidrio de reloj, y presionarlo por encima utilizando una lámina de vidrio gruesa con el fin de que la superficie del mercurio empareje y se remueva el exceso. Inmediatamente se debe retornar el mercurio sobrante a su recipiente correspondiente. A continuación se debe echar el mercurio retenido en el recipiente de contracción en un cilindro volumétrico graduado de vidrio y leer directamente el volumen del recipiente de contracción. Como alternativa, es posible pesar el plato o recipiente de contracción más el mercurio

y luego registrar el peso del recipiente vacío y calcular el volumen basado en un peso promedio unitario para el mercurio de 13.53 g/cm³. Así,

$$V_{\text{plato}} = \frac{\text{peso del mercurio}}{13.53} \quad (4-5)$$

El volumen del recipiente en la ec. (4-5) es también el volumen de suelo húmedo V , usado en la ec. (4-8).

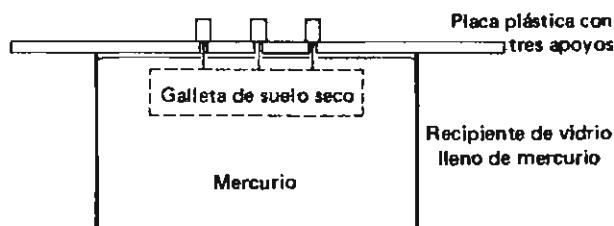
6. Determinar el volumen de la pastilla o galleta de suelo seco V_f de la siguiente forma: en primer lugar, llenar con mercurio el recipiente de vidrio que forma parte del equipo de límite de contracción (ver Fig. 4-1), el cual deberá colocarse de antemano sobre una superficie grande y plana que permita recoger el mercurio sobrante.¹ A continuación se debe tomar la placa de vidrio y hacerla ejercer presión de forma que el mercurio en exceso se derrame del recipiente. El exceso de mercurio debe ser recogido y retorna a su recipiente de almacenamiento. A continuación se debe registrar el peso del recipiente de vidrio lleno de mercurio. Es preciso ser muy cuidadoso para no permitir que se derrame mercurio durante este proceso pues es casi imposible recuperarlo y es posible que se contamine con el suelo o polvo del piso del laboratorio.
7. Retornar el recipiente de vidrio lleno de mercurio a su posición original sobre el recipiente de cartón, y colocar sobre la superficie de mercurio la galleta de suelo seco (debe flotar; ver Fig. 4-3). Tratar de retirar del mercurio, por sifonamiento y mediante simple observación visual, un volumen aproximadamente igual al de la galleta de suelo seco. A continuación se debe tomar la placa de vidrio provista con tres apoyos, colocar los apoyos o puntas sobre la superficie lateral de la galleta de suelo, y sumergirla permitiendo que el mercurio en exceso se derrame siendo desplazado fuera del recipiente de vidrio (Fig. 4-4). Cuando el recipiente de vidrio se encuentre exactamente lleno con el mercurio, la galleta de suelo, y las tres protuberancias o apoyos de la placa de vidrio, se debe retirar la placa de vidrio y la galleta de suelo, y proceder a registrar el peso del recipiente de vidrio y el mercurio remanente. La diferencia entre este peso registrado anteriormente del recipiente de vidrio lleno con mercurio en el paso No. 6, es el peso del mercurio (Δ_{peso}) desplazado por la galleta de suelo seco. El volumen V_f de la galleta de suelo es, entonces:

$$V_f = \frac{\Delta_{\text{peso}}}{13.53} \quad (4-6)$$

En forma alterna, es posible recoger en un plato adecuado el mercurio desplazado cuando se sumerge la galleta de suelo seco. Este mercurio desplazado puede medirse mediante el uso de un cilindro graduado de vidrio con el fin de obtener directamente el volumen de la galleta de suelo seco.

Figura 4-4.

La galleta de suelo seco se sumerge en mercurio para determinar el volumen de mercurio desplazado utilizando una placa de vidrio o plástica con tres apoyos. Nótese que los apoyos no penetran la galleta de suelo. Aún cuando se utilice una tapa de cartón para recibir el mercurio rebosado, es conveniente retirar algo de mercurio del recipiente volumétrico (después de pesarlo lleno), aproximadamente el volumen de la galleta de suelo, esto evita tener una cantidad excesiva de mercurio en el recipiente y por tanto reduce la posibilidad de contacto directo con la piel de la mano.



¹Un recipiente excelente para este fin puede hacerse utilizando un pedazo de cartón común delgado al cual se le pueden doblar hacia arriba los extremos con el fin de hacer un recipiente de 1 a 2 cm de profundidad. Se recomienda utilizar cinta adhesiva (ver Fig. 4-1).

Si durante el secado el suelo se parte en dos o más pedazos, la práctica puede repetirse. Para trabajo con estudiantes, sin embargo, es posible determinar el peso y volumen de la fracción más grande de la galleta y por proporción encontrar el volumen de la galleta completa. Esto requiere la determinación del peso total de la galleta seca lo mismo que el del pedazo mayor escogido. A continuación, por proporción,

$$\frac{V_f}{V_{\text{pedazo}}} = \frac{\text{peso seco total}}{\text{peso seco del pedazo más grande}} \quad (4-7)$$

8. Calcular el límite de contracción (ver Fig. 4-5). El contenido de humedad al comienzo del ensayo debe obtenerse mediante los pasos 2 a 4 como

$$w_i = \frac{W_w}{W_s} 100$$

El límite de contracción se define como el contenido de humedad por debajo del cual no se presentan cambios de volumen al disminuir la humedad. Como el ensayo comienza en una situación de saturación total y se supone que el suelo permanece saturado hasta el límite de contracción, la expresión para el límite de contracción se deriva de la siguiente forma.

El cambio de volumen en el suelo es el siguiente:

$$\Delta V = V_i - V_f \quad (\text{paso 5 a 7}) \quad (4-8)$$

El contenido de humedad en el límite de contracción se calcula a partir del contenido de humedad inicial y el cambio en contenido de humedad hasta el límite de contracción como

$$w_s = w_i - \Delta w$$

pero el cambio en contenido de humedad volumétrico (utilizando la definición $w_w = wW_s$) es:

$$\frac{\Delta w W_s}{\gamma_w} = \Delta V$$

y resolviendo para Δw , se obtiene:

$$\Delta w = \frac{\Delta V \gamma_w}{W_s}$$

Al substituir en la Ec. (4-8) y utilizar unidades cgs, $\gamma_w = 1$, se obtiene que el límite de contracción es el siguiente:

$$w_s = w_i - \frac{\Delta V}{W_s} 100 \quad (4-9)$$

9. Calcular la relación de contracción *SR* utilizando la ec. (4-1).
 10. Calcular la contracción lineal utilizando la ec. (4-3).

El Informe

Al preparar el informe de este proyecto, es preciso discutir por qué se utiliza el mercurio en los puntos 5 y 7. Se debe incluir en la hoja de cálculos la derivación de la ec. (4-1).

Coloque sobre la carta de plasticidad de la Fig. 8-2 el punto correspondiente al límite líquido y al índice de plasticidad del suelo ensayado y extienda una línea hasta el punto de intersección *UL* y *A*. Determine el punto de corte de esta línea con el eje de límite líquido y haga la comparación con el valor obtenido para el límite de contracción w_s . Además determine un valor para la pendiente *promedio* aproximada entre las líneas *UL* y *A*; con estas pendientes promedio dibuje una línea que pase por el punto de ordenada w_L , I_p del ensayo, con el fin de obtener el intercepto con el eje de límite líquido. ¿Cuál

ENSAYO DE LIMITE DE CONTRACCION

Formato 4

Proyecto LIMITE DE CONTRACCION Trabajo No. ~Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~Descripción del Suelo ARCILLA PARDO - ROJIZA OSCURA Profundidad de la Muestra ~Realizado por J.E.B. Fecha de la práctica _____

$$\text{Peso del plato recubierto + el suelo húmedo} = \underline{32.83} \text{ g}$$

$$\text{Peso del plato recubierto + el suelo seco} = \underline{31.92} \text{ g}$$

$$\text{Peso del plato recubierto} = \underline{10.43} \text{ g}$$

$$\text{Peso del suelo, } W_s = \underline{21.49} \text{ g}$$

$$\text{Peso del agua, } W_w = \underline{5.91} \text{ g}$$

$$\text{Contenido de humedad, } W_o \% = \underline{27.50 \%}$$

$$\text{Vol. del suelo húmedo, } V_o = \underline{14.95} \text{ cm}^3 \text{ (Paso 5 del procedimiento: Vol. del plato de contracción} = V_o)$$

$$\text{Vol. del suelo seco, } V_f = \underline{11.61} \text{ cm}^3 \text{ (Paso 7 del procedimiento)}$$

$$\text{Límite de contracción, } w_s = w_o - \frac{(V_o - V_f) \gamma_w}{W_s} \times 100 = \underline{12.0 \%}$$

$$\text{Relación de contracción, SR} = W_s/V_f = \underline{21.49/11.61} = 1.85$$

PESO DEL RECIPIENTE DE CONTRACCION = 21.22 g.

PESO DEL RECIPIENTE DE CONTRACCION + Hg. = 616.73 g.

PESO DEL RECIPIENTE DE CONTRACCION + Hg DESPUES DE SUMERGIR LA GALLETA DE SUELO = 459.62

PESO DE Hg DESPLAZADO = 616.73 - 459.62 = 157.11 g.

$$V_f = \frac{157.11}{13.53} = \underline{\underline{11.61}} \text{ CM}^3$$

PESO DEL PLATO DE LA GALLETA DE SUELO ≈ 10.42 g.

PESO DEL PLATO DE LA GALLETA DE SUELO + Hg = 212.65 g.

$$V_o = \frac{212.65 - 10.42}{13.53} = \underline{\underline{14.95}} \text{ CM}^3$$

$$w_s = 27.50 - \frac{(14.95 - 11.61)(1)(100)}{21.49} = 27.50 - 15.54 = 11.96 \quad (12.0)$$

Figura 4-5.

Datos típicos y cálculos del ensayo de límite de contracción.

de las dos aproximaciones representa mejor el valor obtenido para el límite de contracción? ¿Podría este método emplearse para eliminar el ensayo de contracción? ¿Cómo podría establecer esta posibilidad sin necesidad de llevar a cabo personalmente un gran número de ensayos de límite de contracción w_s ?

Experimento N° 5 **ANALISIS GRANULOMETRICO — METODO MECANICO**

Referencias

AASHTO T87-70 (Preparación de la Muestra); AASHTO T88-70 (Procedimiento de prueba).
ASTM D421-58 y D422-63.

Objetivo (el Instructor¹ debe ver la nota al final del “Procedimiento”)

Introducir al estudiante al método para hacer el análisis granulométrico mecánico de un suelo y a la forma de presentar los resultados obtenidos.

Equipo

Juego de tamices (ver la lista típica en la “exposición general”; también en la Fig. 5-1 y la Tabla 5-1).

Mortero y mano de mortero o un pulverizador mecánico de suelo.

Balanza de sensibilidad 0.1 g.



Figura 5-1
Serie típica de tamices en un vibrador mecánico de tamices.

Exposición General

En la clasificación de los suelos para usos de ingeniería es universalmente acostumbrado utilizar algún tipo de análisis granulométrico (ver Experimento No. 8). Una parte importante de los criterios de aceptabilidad de suelos para carreteras, aeropistas, presas de tierra, diques, y otro tipo de terraplenes es el análisis granulométrico. La información obtenida del análisis granulométrico puede en ocasiones utilizarse para predecir movimientos del

¹ Es aconsejable utilizar arena de depósito (arena para hacer concreto con una pequeña contaminación de finos) en el experimento de forma que no más de 10% del material pase a través del tamiz No. 200 y sea posible calcular los coeficientes C_U y C_C . El material cohesivo del Experimento No. 3 puede usarse en los Experimentos 6, 7, 9 y 14.

Tabla 5-1

Tamaños patrón de tamices. Todos los tamices tipo U. S. se pueden conseguir en un diámetro de 20 cm y la mayoría en 30.5 cm. La designación corriente tipo U. S. varía entre 100 y 6.3 mm en términos del tamaño de la malla; entre los tamices No. 4 (4.75 mm) y No. 18 (1.00 mm) la abertura de malla es en milímetros; desde el No. 20 hasta el No. 400, la malla se mide en micrómetros ($\mu\text{m} = 0.001 \text{ mm}$). El tamiz No. 20 tiene $850 \mu\text{m}$ ó 0.850 mm de abertura de malla. Del tamiz No. 4 hacia abajo, el tamaño de la abertura de malla es aproximadamente $N_i \cong (N - 1)/\sqrt[4]{2}$ (Ejemplo: No. 5 = $4.00 \text{ mm} = 4.75/\sqrt[4]{2}$).

U. S. ^a		NORMA BRITANICA ^b		FRANCES ^c		DIN ALEMAN ^d	
No.	Abertura (mm. ó μm)	No.	Abertura (mm)	No.	Abertura (mm)	Designación μm	Abertura (mm)
	100.0 mm						
	75.0 $\frac{3}{4}^{\text{in}}$						
	63.0						
	50.0 $\frac{2}{3}^{\text{in}}$						
	45.0						
	37.5 $\frac{1}{2}^{\text{in}}$						
	31.5						
	25.0 $\frac{1}{4}^{\text{in}}$						25.0
	19.0 $\frac{3}{8}^{\text{in}}$						20.0
	16.0						18.0
	12.5						16.0
							12.5
	9.5						10.0
	8.0						8.0
	6.3						6.3
4 ^e	4.75			38 ^e	5.000		5.0
5	4.00	5 ^e	3.353	37	4.000		4.0
6	3.35			36	3.150		3.150
7	2.80	6	2.812	35	2.500		2.500
		7	2.411				
8	2.36						
10	2.00	8	2.057	34	2.000		2.000
12	1.70	10	1.676				
14	1.40	12	1.405	33	1.600		1.600
		14	1.204	32	1.250		1.250
16	1.18						
18	1.00	16	1.003	31	1.000		1.000
20	850 μm	18	.853				
25	710	22	.699	30	.800	800	.800
30	600	25	.599	29	.630	630	.630
35	500	30	.500	28	.500	500	.500
40 ^f	425	36 ^f	.422				
45	355	44	.353	27 ^f	.400	400 ^f	.400
50	300	52	.295	26	.315	315	.315

U. S. ^a		NORMA BRITANICA ^b		FRANCES ^c		DIN ALEMAND ^d	
No.	Abertura (mm. ó μm)	No.	Abertura (mm)	No.	Abertura (mm)	Designación μm	Abertura (mm)
60	.250	60	.251	25	.250	250	.250
70	.212	72	.211	24	.200	200	.200
80	.180	85	.178	23	.160	160	.160
100	.150	100	.152				
120	.125	120	.124	22	.125	125	.125
140	.108	150	.104	21	.100	100	.100
170	.090	170	.089	20	.080	90	.090
200	.075	200	.076			80	.080
230	.063	240	.066	19	.063	71	.071
270	.053	300	.053	18	.050	63	.063
325	.045					56	.056
400	.038			17	.040	50	.050
						45	.045
						40	.040

^a ASTM E-11-70 (Parte 41).^b Institución de Normas Británicas, Londres BS-410.^c Especificaciones de Normas Francesas, AFNOR X-11-501.^d Especificación de Normas Alemanas, DIN 4188.^e Para ensayo de compactación patrón.^f Para límites de Atterberg.

agua a través del suelo, aún cuando los ensayos de permeabilidad (Experimentos Nos. 11 y 12) se utilizan más comúnmente. La susceptibilidad de sufrir la acción de las heladas en suelo, una consideración de gran importancia en climas muy fríos, puede predecirse a partir del análisis granulométrico del suelo.

Los suelos muy finos son fácilmente arrastrados en suspensión por el agua que circula a través del suelo y los sistemas de subdrenaje usualmente se colman con sedimentos rápidamente a menos que sean protegidos adecuadamente por filtros de material granular debidamente gradado. La gradación adecuada de estos materiales, denominados *filtros*, puede ser establecida a partir de su análisis granulométrico.

El análisis granulométrico es un intento de determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa de suelos dada. Obviamente para obtener un resultado significativo la muestra debe ser *estadísticamente representativa* de la masa de suelo. Como no es físicamente posible determinar el tamaño real de cada partícula independiente de suelo —la práctica solamente agrupa los materiales por rangos de tamaño. Para lograr esto se obtiene la cantidad de material que pasa a través de un tamiz con una malla dada pero que es retenido en un siguiente tamiz cuya malla tiene diámetros ligeramente menores a la anterior y se relaciona esta cantidad retenida con el total de la muestra pasada a través de los tamices. Es evidente que el material retenido de esta forma en cualquier tamiz consiste de partículas de muchos tamaños todos los cuales son menores al tamaño de la malla a través de la cual todo el material pasó pero mayores que el tamaño de la malla del tamiz en el cual el suelo fue retenido.

Los tamices son hechos de malla de alambre forjado con aberturas rectangulares que varían en tamaño desde 101.6 mm (4") en la serie más gruesa hasta el número 400 (0,038 mm) en la serie correspondiente a suelo fino. La Tabla 5-1 presenta una lista conjunta de los tamices disponibles comúnmente, con la correspondiente abertura de malla. El tamiz No. 200 (0.075 mm) es el tamiz más pequeño en la práctica. Para mallas de tamaño inferior al de este tamiz es difícil permitir el paso libre del agua. El suelo, por supuesto, provee generalmente más resistencia que el agua al tamizado; por consiguiente, los tamices de malla más

Antes de 1970	Actual
4- ["] (101.6 mm)	100 mm
1 ¹ / ₂ - ["] (38.1 mm)	37.5
1- ["] (6.35 mm)	6.3
No. 20 (0.841 mm)	0.850
No. 100 (0.149 mm)	0.150
No. 200 (0.074 mm)	0.075

pequeña que el número 200 son más interesantes desde el punto de vista académico que desde el práctico (Ver Fig. 5-2).

La Tabla 5-1 muestra las últimas designaciones oficiales de la ASTM y de la Oficina Nacional de Normas de los Estados Unidos. Estos tamaños son ligeramente diferentes de aquellos establecidos por las designaciones anteriores (antes de 1970) y/o de aquellos que puedan encontrarse en series antiguas todavía en uso, es decir, típicamente.

El lector puede utilizar las designaciones actuales sobre tamaños (como se presenta en la Tabla 5-1) para registrar y dibujar los datos de laboratorio teniendo en cuenta que:

1. La mejora en precisión es casi inexistente, y
2. Los tamices antiguos desaparecerán rápidamente a medida que se desgasten y sean reemplazados.

Todos los sistemas de clasificación utilizan el tamiz No. 200 como un punto divisorio; i. e., las clasificaciones se basan generalmente en términos de la cantidad retenida o la cantidad que pasa a través del tamiz No. 200. Ocasionalmente es deseable conocer la escala *aproximada* de partículas de suelo menores que el tamiz 200. Cuando se presenta esta necesidad (como en el caso de los laboratorios universitarios para lograr la familiarización del estudiante con el procedimiento), el método del siguiente proyecto "análisis granulométrico —método del hidrómetro", es comúnmente utilizado.

El proceso de tamizado no provee información sobre la forma de los granos de suelo i. e., si ellos son angulares o redondeados. Solamente da información sobre los granos que pueden pasar, o qué orientación adecuada pasa, a través de una malla de abertura rectangular de un cierto tamaño. Obviamente, en muestras de un cierto tamaño no siempre es posible que todas las partículas pasen a través del tamiz respectivo, ya que es posible que no se puedan orientar adecuadamente para pasar a través de su tamiz correspondiente. Las partículas más pequeñas podrían no haber sido totalmente separadas en el proceso de pulverización, e incluso las partículas más finas —especialmente la fracción menor que el tamiz 200 en tamaño (i. e., el material que pasaría a través del tamiz No. 200)— pueden adherirse a las partículas mayores y no pasar a través del tamiz adecuado.

La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en forma de curva. Para poder comparar suelos y visualizar más fácilmente la distribución de los tamaños de granos presentes, y como una masa de suelos típica puede tener partículas que varíen entre tamaños de 2.00 mm y 0.075 mm las más pequeñas (tamiz No. 200), por lo cual sería necesario recurrir a una escala muy grande para poder dar el mismo peso y precisión de lectura a todas las medidas, es necesario recurrir a una representación logarítmica para los tamaños de partículas. Los procedimientos patrones utilizan el *porcentaje que pasa* (también llamado *porcentaje más fino*) como la ordenada en la escala natural de la curva de distribución granulométrica. Algunos ejemplos utilizados en el tema presentan la curva granulométrica dibujada con el eje de tamaños de partículas de izquierda hacia derecha. Esta práctica produce una curva igual a la del autor mirada a contraluz.

En la Fig. 5-4 se muestran curvas típicas de distribución granulométrica para *suelos de grano fino*¹. Una de las curvas de dicha figura se obtiene a partir de los datos mostrados en la Fig. 5-3. Una distribución granulométrica para un suelo de granos más gruesos debería estar desplazada a la izquierda.

¹ El término suelo de grano fino es utilizado aquí en el contexto de que del 90 al 95% del material pasa a través del tamiz No. 4 (algunas veces a través del tamiz No. 10).

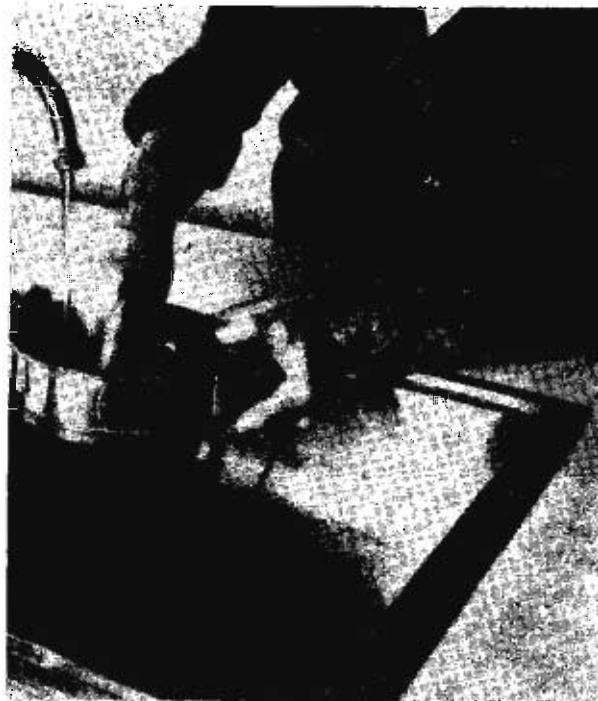


Figura 5-2

Lavado del suelo a través del tamiz No. 200. Se pueden conseguir tamices más profundos para este propósito; sin embargo, si se trabaja con cuidado es posible utilizar el tamiz No. 200 normal, como se muestra en esta figura.

Es evidente que una curva de distribución granulométrica solo puede aproximar la situación real. Esto se debe a las varias razones consideradas hasta aquí, incluyendo las limitaciones físicas para obtener muestras estadísticamente representativas, la presencia de grumos en el suelo, la limitación práctica impuesta por la utilización de mallas de forma regular para medir partículas de suelo de forma irregular y el número limitado de tamices utilizables en el análisis. La exactitud del análisis es más cuestionable aún para suelos de grano fino (más fino que el tamiz No. 4) que para suelos gruesos, y la práctica común y ampliamente seguida de utilizar suelos secados al horno puede influir el análisis en otro tanto. El autor es de la opinión de que el secado al horno es uno de los factores menos significativos del ensayo; el tener una muestra representativa y el lograr la reducción de todos los grumos a partículas elementales mediante el lavado son factores mucho más importantes. La curva de distribución granulométrica que se obtiene siguiendo el "procedimiento" que se presenta a continuación es satisfactoria para predecir el comportamiento de suelos no cohesivos y obtener las cantidades relativas mayores y menores al tamiz No. 200, para clasificación de suelos.

El autor ha encontrado que un método más confiable y del cual se puede realizar más fácilmente una reproducción que el análisis por tamizado de un suelo de grano fino con más de 4 ó 5% de material más fino que el tamiz No. 200, es el de tomar una cantidad seca al horno de ese material, molerla tan fino como sea posible, luego lavarla a través del tamiz No. 200 (como se ilustra en la Figura 5-2), secar al horno el residuo y tamizar a través de una serie constituida por 5 ó 6 tamices dentro de un rango de tamaños que garanticen suficientes puntos para la gráfica. Este método asegura que muy poco polvo se adhiera a las partículas mayores y que los grumos de material fino blandidos por el agua, se desbaraten y permitan que las partículas de arcilla pasen a través del tamiz y luego del secado las partículas aisladas permanezcan separadas. Este método se utiliza para dibujar la curva A (información no mostrada) de la Fig. 5-4. El anterior es un método particularmente deseable cuando se utiliza un microscopio para determinar la forma de los granos como una información suplementaria a la curva de distribución granulométrica.

Cuando menos del 10 al 15% del material pasa a través del tamiz No. 10 (2.00 mm) no es deseable o práctico para estos suelos (gravas o arenas gravosas) el procedimiento de lavado a través del tamiz. El lavado es usualmente innecesario cuando solo 5 ó 10% pasa a través del tamiz No. 100 (0.150 mm) para los suelos de grano fino. De todos modos, el gran-

tamaño de muestra (100 a 5000 g) necesaria en suelos de grano grueso hace el lavado bastante impráctico.

La naturaleza estadística de la distribución de tamaños de partículas en un suelo hace que aun las muestras representativas más cuidadosas produzcan curvas de granulometría no muy reproducibles. Se puede decir que se ha obtenido un análisis "reproducible" si el porcentaje de finos se encuentra en el orden de más o menos 1.5% del material más fino que el tamiz No. 4 y aproximadamente más o menos 2.5% para los suelos granulares. Por esta razón la escala utilizada en los gráficos mostrados es satisfactoria para uso general.

La serie de tamices (comúnmente 6 ó 7) consiste generalmente en un grupo de tamices seleccionados de forma que la abertura de la malla de cada tamiz sea el doble de la abertura de la malla anterior de abajo hacia arriba como 6, 12, 24 mm ó 0.075, 0.150, 0.300 mm, etc. Por conveniencia y debido a razones prácticas tales como la disponibilidad de tamices, y al tamaño de la serie misma, o la necesidad de introducir tamices de control como los números 4, 100, 200 u otros tamaños, es necesario algunas veces omitir algunos tamaños de tamiz i. e., usar la serie No. 10, 30, 50, 100, 200, en lugar de la serie de número 10, 20, 40, 80, 160, etc. Una sujeción estricta a la norma de doblar siempre el tamaño del tamiz no mejora del todo la distribución granulométrica y lo que realmente se necesita es la utilización para producir la curva, de un número razonable de puntos que permitan una confiabilidad estadística. La norma de doblar el diámetro debe ser recordada y utilizada como guía para desarrollar la serie de tamices. Para analizar suelos finos, debe ponerse siempre un tamiz número 200 al final de la serie; una serie para analizar arena que debe utilizarse como agregado para hormigones, debe siempre terminar en el tamiz número 100.

A partir de la curva de distribución granulométrica, se pueden obtener diámetros característicos tales como el D_{10} , D_{85} , D_{60} , etc. El D se refiere al tamaño del grano, o diámetro aparente, de la partícula de suelo y el subíndice (10, 85, 60) denota el porcentaje de material más fino. Por ejemplo, $D_{10} = 0.15$ mm para la curva B de la Fig. 5-4 significa que el 10% de los granos de la muestra son menores en diámetro que 0.15 mm. El diámetro D_{10} es también llamado *el tamaño efectivo* de un suelo.

Una indicación de la variación (o rango) del tamaño de los granos presentes en la muestra se obtienen mediante el *coeficiente de uniformidad* C_U , definido como:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5-1)$$

Un valor grande en este parámetro C_U indica que los diámetros D_{60} y D_{10} difieren en tamaño apreciablemente. No asegura sin embargo, que no exista un vacío de gradación, como el que se presenta cuando faltan por completo o solamente existe una muy pequeña cantidad de diámetros de un determinado tamaño. El *coeficiente de concavidad* C_C es una medida de la forma de la curva entre el D_{60} y el D_{10} , y se define de la siguiente forma

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{(D_{10}D_{60})} \quad (5-2)$$

Valores de C_C muy diferentes de 1.0 indican que falta una serie de diámetros entre los tamaños correspondientes al D_{10} y el D_{60} . Cálculos típicos para el C_U y el C_C se muestran en la Fig. 5-4 para el suelo B; nótese que los valores calculados a la 0.1 son suficientemente precisos. Estos valores se utilizan en la clasificación del suelo en el Experimento No. 8. Los diámetros correspondientes al D_{15} y al D_{85} pueden utilizarse para determinar la capacidad del suelo para ser utilizado en diseños de filtros para una presa o para recubrir los agujeros de tubería perforada utilizada como sistema de sub-drenaje dentro de un suelo.

El método para hacer el análisis de distribución granulométrica presentado en esta práctica es esencialmente el mismo utilizado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos y la mayoría de las firmas consultoras pero difiere del sugerido por la norma ASTM en el cual se divide el suelo *secado al aire* en fracción superior e inferior al tamiz No. 10 (2.00 mm). La cantidad de material superior en tamaño al tamiz No. 10 depende del tamaño de la máxima partícula presente en la muestra y varía entre 500 y 5000 gm como se

muestra en la Figura 5-3. A continuación el material superior al tamiz No. 10 se hace pasar a través de una serie de tamices como se ha descrito hasta aquí (sin hacer lavado de las partículas) seleccionado con base en inspección visual del rango de partículas y el uso de la sugerencia previamente descrita de doblar siempre el tamaño de la malla. El material inferior al tamiz No. 10 se analiza como se sugiere en el Experimento No. 6 y al final de dicho ensayo, se hace un lavado del material a través del tamiz 200, y dicho residuo secado al horno, se utiliza para hacer un nuevo análisis de tamizado. La curva de distribución granulométrica obtenida de esta forma está compuesta de la fracción superior del tamiz No. 10 del hidrómetro y del análisis de tamizado hecho sobre el residuo secado al horno. El autor no recomienda este procedimiento (primordialmente para evitar el secado al horno) debido a que es necesario utilizar un mínimo de 115 g de material menor que el tamiz No. 10, lo cual supera la capacidad de hidrómetro tipo 152 H. Adicionalmente, muchos de los diámetros de partícula presentes (2.00 a cualquiera, en mm) son demasiado grandes para la teoría del hidrómetro; el método es menos directo y por último, el secado al horno no es un factor significativo para el uso común en la determinación de la curva granulométrica. Por supuesto, el factor particular del secado al horno, podría ser adecuadamente modificado para trabajo en laboratorio.

Para suelos en los cuales más del 10 al 12% del material pase a través del tamiz No. 200, para los cuales es necesario también hacer un análisis de hidrómetro, el lector debe estudiar tanto el "procedimiento" que se presenta a continuación, como el Experimento No. 6 en especial el método *B*.

Procedimiento *Esta es una práctica de grupo*

1. Cada grupo debe obtener exactamente 500 g (200 g a discreción del instructor, pero las muestras mayores son estadísticamente más representativas) de suelo secado al horno tomado de una bolsa de muestra obtenida en el terreno en desarrollo del Experimento No. 2 o de algún recipiente de suelo suministrado por el instructor para este experimento en particular. Es necesario asegurarse de que la muestra sea *representativa* para lo cual es posible utilizar un cuarteador mecánico (si hay uno disponible) teniendo simplemente el cuidado de tomar la muestra de diferentes sitios dentro del recipiente mientras se remueve continuamente su contenido hasta lograr la cantidad necesaria.

Si la muestra debe lavarse no es necesario pulverizar el suelo; sin embargo, el proceso se agiliza considerablemente si con anterioridad se pulveriza el suelo seco y se hace pasar a través de un tamiz No. 200, descartando la fracción menor.

2. Si la muestra contiene apreciable cantidad de gravas, y muy pocos finos, o a discreción del instructor, el lavado se puede omitir y en ese caso seguir al paso 4.

Colocar la muestra sobre el tamiz No. 200 y lavar cuidadosamente el material a través del tamiz utilizando agua común (ver Fig. 5-2) hasta cuando el agua que pasa a través del tamiz mantenga su transparencia. Es necesario ser muy cuidadoso en este proceso para evitar daños en el tamiz y la pérdida de suelo que eventualmente pueda salpicar fuera del tamiz.

3. Verter cuidadosamente el residuo, con ayuda de agua, en un gran recipiente desecador, y permitirle sedimentar por un período de tiempo suficiente hasta lograr que el agua en la parte superficial de la suspensión se vuelva transparente. Botar tanto como se pueda de esta agua transparente, y colocar el recipiente con la suspensión suelo y agua en el horno para secado.

4. Al día siguiente, regresar al laboratorio y pesar el residuo secado al horno (si no se ha hecho el lavado omitir esto, por supuesto).

A continuación, bien inmediatamente (si no se ha hecho lavado) o al día siguiente (si se ha hecho lavado) hacer pasar la muestra a través de una serie de tamices que varíen desde los diámetros mayores arriba hasta los diámetros inferiores abajo. Como el objetivo de la práctica es lograr una curva semilogarítmica del porcentaje de material más fino contra el tamaño de las partículas, será necesario obtener una distribución razonable de puntos a lo largo del rango potencial de diámetros presentes en la muestra.

Para suelos arenosos con granos finos, se recomiendan dos series de tamices (en orden de arriba hacia abajo) como siguen:

SERIE TÍPICA DE TAMICES		SERIE ALTERNATIVA DE TAMICES	
Tamiz No.	Abertura (mm)	Tamiz No.	Abertura (mm)
Tapa		Tapa	
4	4.75	4	
10	2.00	10	
20	0.850	30	0.600
40	0.425	50	0.300
60	0.250	100	0.150
140	0.106	200	0.075
200	0.075	Bandeja	
		Bandeja	

Si hay gravas pequeñas en la muestra podría utilizarse un tamiz 12.5 y/o 6.30 mm antes del tamiz No. 4 en la serie. Para muestras con gravas de gran tamaño, debería utilizarse una muestra mayor en conjunción con una adecuada serie de tamices. Una serie típica recomendable sería la siguiente (dependiendo del máximo tamaño de partículas presente en la muestra):

50 mm (dependiendo del máximo tamaño de agregado utilizando inspección visual)
 25 mm
 12.5 mm
 6.3 mm
 2.00 (No. 10)
 0.85 (No. 20)
 0.150 (No. 100)

El tamaño de la muestra varía entre 1500 g, para gravas con partículas máximas de 19 mm hasta 5000 g para materiales cuya partícula máxima tenga 75 mm.

5. Colocar la serie de tamices en un agitador eléctrico automático (si existe uno disponible) y tamizar aproximadamente 5 a 10 minutos, dependiendo de una inspección visual sobre la dificultad probable dada la cantidad de material. En caso de que la serie de tamices no quiera físicamente dentro del agitador automático, es posible hacer el tamizado manual a través de los tamices superiores de diámetro más grueso y removerlos de la serie; colocar los tamices restantes en el agitador mecánico. Si no se dispone de agitador mecánico puede hacerse el tamizado manual por cerca de 10 minutos. Alternar el modo de agitación de forma que los granos sean impulsados continuamente a pasar a través de las mallas; no es aconsejable mantener un ritmo fijo durante la agitación.
6. Quitar la serie de tamices del agitador mecánico y obtener el peso del material que quedó retendio en cada tamiz. Sumar estos pesos y comparar el total con el peso total obtenido en el paso 4 (el residuo de material procedente del secado al horno con el cual se comenzó). Esta operación permite detectar cualquier pérdida de suelo durante el proceso de tamizado mecánico. Si se tiene una pérdida de más del 2% con respecto al peso original del residuo (paso 4) se considera que el experimento no es satisfactorio y por consiguiente debe repetirse. *Pregunta:* ¿A qué podría atribuirse la discrepancia, en el caso de que el peso registrado sea mayor que el peso inicial?
7. Calcular el porcentaje en cada tamiz dividiendo el peso retenido en cada uno de ellos por *el peso de la muestra original* utilizado en el paso 2. Esto es válido ya que el material que haya pasado a través del tamiz 200 pasaría cualquier otro tamiz por encima del tamiz 200 en la serie.
8. Calcular el porcentaje que pasa (o el porcentaje más fino que) comenzando por 100% y subtraer el porcentaje retenido en cada tamiz como un proceso acumulativo. Por ejemplo, de los datos obtenidos en el análisis de tamizado mostrado en la Fig. 5-3, la cantidad de 490.3 g (500 - 9.7 g) pasó el tamiz No. 4; el porcentaje retenido es de $(9.7/500 \times 100 = 1.9)$ por ciento y el porcentaje que pasa debe ser aquél que no es retenido, o sea

ANALISIS GRANULOMETRICO-MECANICO

Formato 5

Proyecto ANALISIS POR TAMIZADO Trabajo No. _____

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~

Descripción del Suelo ARENA MEDIA A GRUESA, Parda Profundidad de la Muestra

Realizado por J.E.B Fecha de la práctica 3-12-76

Tamaño de los Muestras de Suelo (ASTM D1118-51)

<i>Tamaño de la Muestra de Suelo (ASTM D1140-54)</i>	
Diámetro nominal de la partícula mayor	Peso mínimo aproximado de muestra, g
Tamiz No. 10	200
tamiz No. 4	500
3/4 pulg.	1500

Peso de la muestra seca + recipiente	893.7	LAVADO: 500 g.
Peso del recipiente	421.2	$500 - 472.5 = 27.5 \text{ g}$ LAVADO
Peso de la muestra seca, W_s	472.59	

Análisis por tamizado y forma de gramos

Taniz No.	Diam. (mm)	Peso retenido	% retenido	% que pasa
4	4.75	9.79	1.9%	98.1%
10	2.00	39.5	7.9	90.2
20	0.840	71.6	14.3	75.9
40	0.425	129.1	25.8	50.1
60	0.250	107.4	21.5	28.6
100	0.150	105.0	21.0	27.6
200	0.075	8.5	1.7	5.9
BANDEJA	—	1.3		
		<u>$\Sigma = 472.1 \text{ (472.5 O.K.)}$</u>		
		$\% \text{ RET}_{(4)} = \frac{9.79(100)}{500} = 1.9\%$		
		$\% \text{ QUE PASA} = 100 - 1.9 = 98.1\%$		

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \sum \% \text{ retenido.}$$

Figura 5-3.

Datos típicos de análisis granulométrico mecánico (usados para construir la curva B de la Fig. 5-4).

DISTRIBUCION GRANULOMETRICA

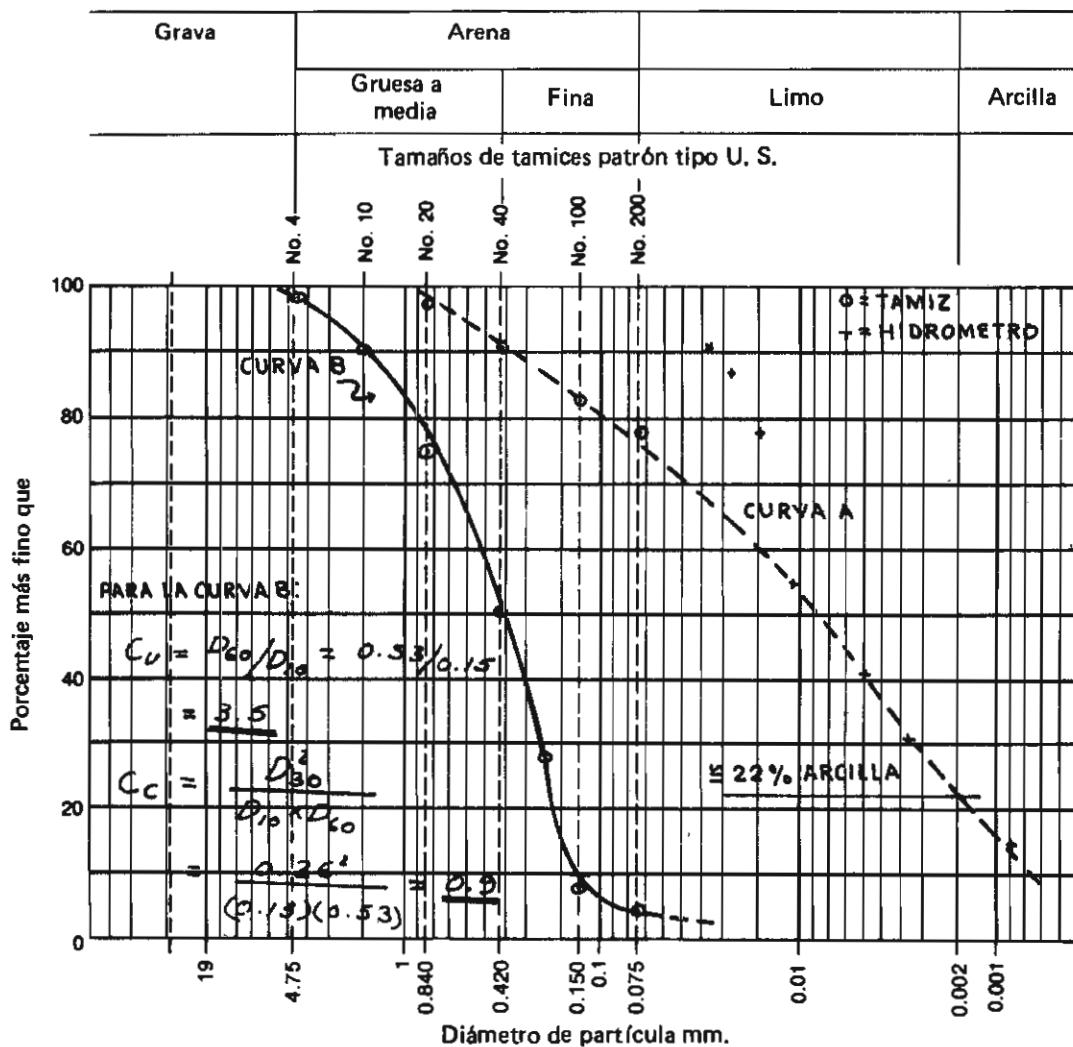
Formato 6

Proyecto ANALISIS POR TAMIZADO ILUSTRATIVO Trabajo No. ~

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~

Descripción del Suelo ARENA Y ARCILLA Profundidad de la Muestra ~

Realizado por J.E.B Fecha de la práctica ARENA: 7-12-76



Descripción Visual SUELO B: ARENA LIMPIA, MEDIO GRUESA, PARDAS

Clasificación del Suelo NOTA: EL SUELO A PROVIENE DEL EXP. 6, SIN EMBARGO NO TODOS LOS

PUNTOS SE INCLUYERON EN LA GRAFICA Sistema _____

Figura 5-4

Curvas granulométricas típicas. La curva B es construida con los datos de la Fig. 5-3. La parte de análisis hidrométrico de la curva A corresponde a los datos de la Fig. 6-4. Nótese la discontinuidad entre los datos mecánicos e hidrométricos en la curva A; se le da más peso a los datos del análisis mecánico.

$100 - 1.9 = 98.1$ por ciento del material. Como todo lo que no fue retenido pasó el porcentaje que pasa es

$$98.1 - 7.9 = 90.2 \text{ por ciento}$$

Nótese que se utiliza 98.1 aquí ya que éste fue el porcentaje que llegó al tamiz No. 10. En general el porcentaje que pasa se calcula como:

$$\text{porcentaje que pasa} = \text{porcentaje que llega} - \text{porcentaje retenido} \quad (5-3)$$

9. Cada miembro del grupo debe hacer una gráfica semilogarítmica del tamaño de la partícula contra el porcentaje más fino utilizando la gráfica que se presenta como formato para este experimento (ver Fig. 5-4 y obtener la hoja de datos de la correspondiente hoja de datos del manual).
 - a. Si menos de 12% del material pasa a través del tamiz No. 200, es necesario calcular el C_U y el C_C y mostrarlos en la gráfica tal como se muestra en la Fig. 5-4 (también en la "discusión"). Contestar la siguiente pregunta: ¿Por qué el C_U y el C_C se calculan solamente cuando menos del 12% del material pasa a través del tamiz No. 200?
 - b. Si más del 12% de la muestra pasa a través del tamiz No. 200 es necesario hacer un análisis de hidrómetro (Exp. No. 6) sobre el suelo y en este caso es necesario guardar los datos hasta que el Exp. No. 6 esté completo de forma que la curva granulométrica pueda terminarse antes de entregar el informe.
10. En la "discusión" del informe debe darse por lo menos cinco usos para la curva de granulometría del suelo que se acaba de hacer.

Nota al Instructor

Si se usa suelo granular de grano grueso, con menos del 10% del material más fino que el tamiz No. 200 de forma que los estudiantes puedan calcular C_U y C_C , y omitir la secuencia de lavado, se sugiere que los estudiantes también hagan el lavado de una muestra de 200 g de suelo para ser utilizado posteriormente en el Exp. No. 6, a través del tamiz No. 200 durante esta sesión de laboratorio y determinar el porcentaje que pasa a través de varios tamices. Posteriormente estos datos pueden ser combinados con el análisis de hidrómetro del siguiente período de laboratorio.

Experimento N° 6

ANALISIS GRANULOMETRICO — METODO DEL HIDROMETRO

Referencias

AASHTO T87-70 y T-88-70
ASTM D421-58 y D422-63

Objetivo

Familiarizar al estudiante con un método para obtener *aproximadamente* la distribución granulométrica de suelos en los cuales existe una cantidad apreciable de partículas inferiores al tamiz No. 200.

Equipo

Cilindro de sedimentación (cilindro de 1000 cm³), también conocido como *cilindro de hidrómetro* (Fig. 6-1).

Hidrómetro (modelo 152 H preferiblemente)

Aparato para dispersar el suelo (mezcladora de leche malteada).

Agente dispersivo [hexametafosfato sodio (NaPO₃), cuyo nombre comercial es Calgón, o silicato de sodio (Na₂SiO₃) también llamado *vidrio líquido*].

Un baño de temperatura controlada para el cilindro del hidrómetro (opcional).

Termómetro

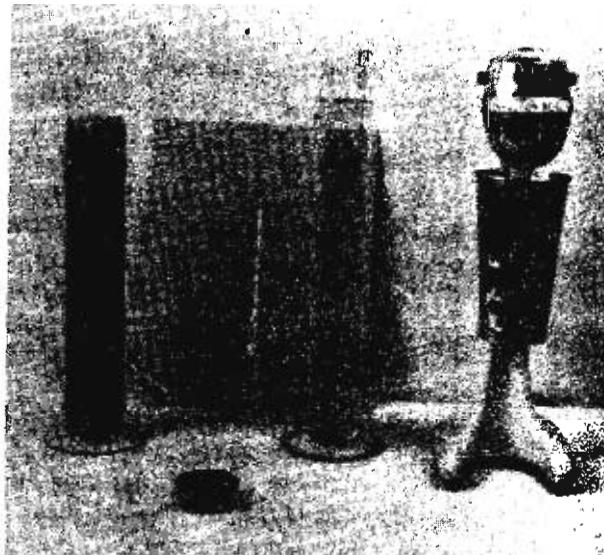


Figura 6-1

Equipo para análisis hidrométrico: a la izquierda, probeta para hidrómetro lleno hasta la marca de 1000 ml con suspensión suelo-agua; a la derecha, probeta de 1000 ml graduada para utilizar como recipiente de control; mezclador de refrescos utilizado para preparar la suspensión suelo-agua; tapón de caucho grande (No. 12) para la mezcla final de la suspensión suelo-agua; hidrómetro (152H) en el fondo; en el recipiente de control se parecía un termómetro suspendido del borde por medio de una pinza (clip) enderezada.

Discusión General

El análisis de hidrómetro es un método ampliamente utilizado para obtener un estimado de la distribución granulométrica de suelos cuyas partículas se encuentran desde el tamiz No. 200 (0.075 mm) hasta alrededor de 0.001 mm. Los datos se presentan en un gráfico

semilogartímico de porcentaje de material más fino contra diámetro de los granos y puede combinarse con los datos obtenidos en el análisis mecánico del material retenido, o sea mayor que el tamiz No. 200 (u otro tamaño cualquiera) como se hizo en el Experimento No. 5. En la Fig. 5-4 se muestra la curva combinada señalada con la letra A.

El principal objetivo del análisis de hidrómetro es obtener el porcentaje de arcilla (porcentaje más fino que 0.002 mm) ya que la curva de distribución granulométrica cuando más del 12% del material pasa a través del tamiz No. 200 no es utilizada como criterio dentro de ningún sistema de clasificación de suelos y no existe ningún tipo de conducta particular del material que dependa intrínsecamente de la forma de dicha curva. La conducta de la fracción de suelo cohesivo del suelo dado depende principalmente del tipo y porcentaje de arcilla de suelo presente, de su historia geológica y del contenido de humedad más que de la distribución misma de los tamaños de partícula.

El análisis de hidrómetro utiliza la relación entre la velocidad de caída de esferas en un fluido, el diámetro de la esfera, el peso específico tanto de la esfera como del fluido, y la viscosidad del fluido, en la forma expresada por el físico Inglés G. G. Stokes (ca. 1850) en la ecuación conocida como *la ley de Stokes*:

$$v = \frac{2\gamma_s - \gamma_w}{9\eta} \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (6-1)$$

donde v = velocidad de caída de la esfera, cm/s

γ_s = peso específico de la esfera (peso específico = densidad $\times g$ = masa/unidad de volumen \times gravedad = g/cm³ en el sistema cgs).

γ_w = peso específico del fluido (usualmente agua, ver la Tabla 6-1).

η = viscosidad absoluta, o dinámica del fluido, dinas \times segundo sobre cm² (o g/cm \cdot s).

D = diámetro de la esfera, cm

g = 980.7 cm/s²

1 g = 980.7 dinas

Al resolver la ecuación (6-1) para D utilizando el peso específico del agua, se obtiene:

$$D = \frac{18\eta v}{\gamma_s - \gamma_w} \quad \text{cm} \quad (6-2)$$

El rango de los diámetros D de partículas de suelo para los cuales esta ecuación es válida, es aproximadamente:

$$0.0002 \text{ mm} \leq D \leq 0.2 \text{ mm}$$

pues los granos mayores causan excesiva turbulencia en el fluido y los granos muy pequeños están sujetos a movimientos de tipo Browniano (i. e., sujetos a fuerza de atracción y repulsión entre partículas).

Obviamente, para resolver la ec. (6-2) es necesario obtener el término velocidad v , conocer los valores correctos de γ_s y γ_w y tener acceso a la tabla de viscosidad del agua. Como el peso específico del agua y su viscosidad varían con la temperatura, es evidente que esta variable también debe ser considerada.

Para obtener la velocidad de caída de las partículas se utiliza el hidrómetro. Este aparato se desarrolló originalmente para determinar la gravedad específica de una solución, pero alterando su escala se puede utilizar para leer otros valores.

Al mezclar una cantidad de suelo con agua y un pequeño contenido de un agente dispersante para formar una solución de 1000 cm³, se obtiene una solución con una gravedad específica ligeramente mayor que 1.000 (ya que G del agua destilada es 1.000 a 4°C). El agente dispersante (también llamado defloculante) se añade a la solución para neutralizar las cargas sobre las partículas más pequeñas de suelo, que a menudo tienen carga negativa. Con orientación adecuada, estos granos cargados eléctricamente se atraen entre sí con fuerza suficiente para permanecer unidos, creando así unidades mayores que funcionan como partículas. De acuerdo con la ley de Stokes, estas partículas mayores sedimentarán más rápidamente a través del fluido que las partículas aisladas. El hexa-metafosfato de sodio, también

llamado metafosfato (NaPO_3), y el silicato de sodio o vidrio líquido (Na_3SiO_3), son dos materiales usados muy a menudo como agentes dispersores para neutralizar la carga eléctrica de las partículas de suelo. La cantidad exacta y el tipo de agentes dispersantes requeridos dependen del tipo de suelo y pueden ser determinados por ensayo y error. Una cantidad de 125 cm^3 de solución al 4% de hexa-metrafosfato de sodio en los 1000 cm^3 de suspensión de agua-suelo se han considerado en general adecuados. Si la suspensión de suelo-agua se aclara en un tiempo muy corto —en 2 ó 3 horas por ejemplo— la cantidad de agentes dispersante debería ser mayor o utilizarse un tipo diferente, pues un suelo con cantidad apreciable de partículas de tamaño de arcillas permanecería muy turbio (apariencia de barro) por varios días.

El metrafosfato de sodio produce una solución ácida (torna azul los papeles utilizados para determinar acidez) y por consiguiente se podría esperar una mayor eficacia como agente dispersivo en suelos alcalinos. El silicato de sodio, por otra parte, produce una solución alcalina (torna rosado al papel utilizado para medir acidez) y debería ser más eficiente en suelos ácidos o suelos cuyo pH es menor de 7. La mayoría de las arcillas son “alcalinas”. La presencia de cierta sal u otras impurezas, sin embargo, puede crear una condición “ácida”. Para ser estrictos se debería determinar el pH de la solución antes de utilizar arbitrariamente algún agente dispersivo.

Es interesante anotar que este ensayo es ejecutado por algunos ingenieros en Inglaterra con un poco más de refinamiento: cerca de 100 g de suelo se tratan inicialmente con unos 100 ml de peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) en solución al 6% hasta que se saquen todas las burbujas de gas de la muestra (esto remueve los materiales orgánicos). Este tratamiento puede tomar varios días y requerir cantidades adicionales de peróxido de hidrógeno. A continuación el suelo es tratado con cerca de 100 ml de 0.2 N ácido clorhídrico (17 ml de ácido clorhídrico concentrado por litro de agua hacen una solución 0.2 N) para remover los compuestos de calcio que pudiesen aparecer durante el ensayo de descomposición. Este tratamiento debe continuarse hasta que el suelo produzca una reacción ácida al papel colorimétrico (pasar de azul a rosado). En este momento el suelo se encuentra listo para ser usado y cerca de 50 g del material tratado se debe mezclar con 250 ml de solución a la cual se haya añadido 8 g de oxalato de sodio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) por 1000 cm^3 como agente dispersante. El oxalato de sodio produce una solución alcalina; de forma que su adición causa la neutralización de la suspensión suelo-agua. A continuación se mezcla la suspensión de

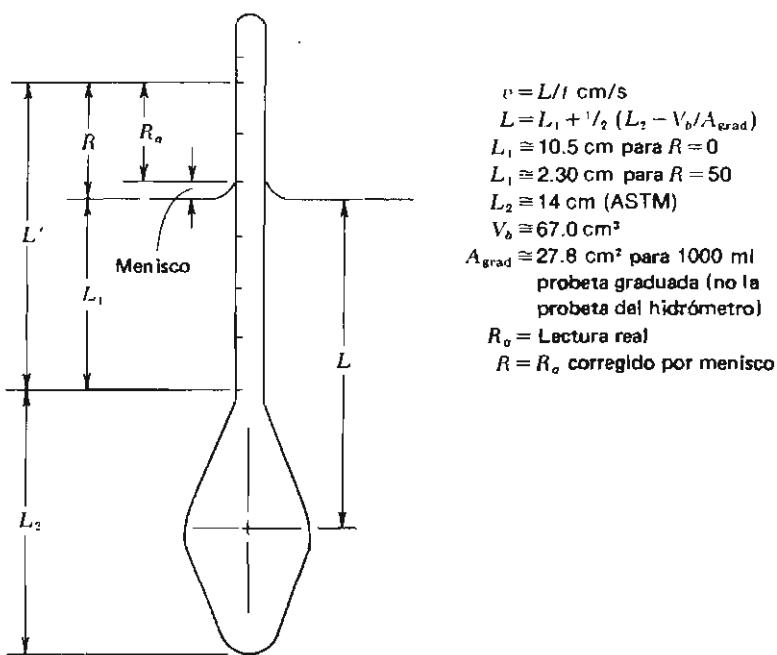


Figura 6-2
Dimensiones y términos
del hidrómetro.

agua y suelo con el oxalato de sodio utilizando una batidora de leche malteada durante 15 minutos; este material se transfiere al cilindro de sedimentación y se hace el ensayo como se explica más adelante.

El hidrómetro usado más comúnmente es el tipo 152H (designado por la norma ASTM) y está calibrado para leer g de suelo de un valor de $G_s = 2.65$ en 1000 cm^3 de suspensión siempre que no haya más de 60 g de suelo en la solución. La lectura por consiguiente está directamente relacionada con la gravedad específica de la solución. Esta calibración particular del hidrómetro es una ayuda considerable, como se verá a continuación. Por esta razón este tipo de hidrómetro se utiliza muy ampliamente, a pesar de existir otros tipos de hidrómetros que pueden ser leídos en términos de la gravedad específica de la suspensión suelo-agua. Para estos últimos hidrómetros, debe tenerse mucho cuidado en no usar más de 60 g de solución de suelo por litro de solución para evitar la interferencia entre las partículas granulares durante la sedimentación, lo cual empobrece los resultados obtenidos de la aplicación de la ley de Stokes.

El hidrómetro determina la gravedad específica de la suspensión agua-suelo en el centro del bulbo (referirse a la Fig. 6-2). Todas las partículas de mayor tamaño que aquéllas que se encuentren aún en suspensión en la zona mostrada como L (la distancia entre el centro de volumen del bulbo y la superficie del agua) habrán caído por debajo de la profundidad del centro de volumen, y esto hace decrecer permanentemente la gravedad específica de la suspensión en el centro de volumen del hidrómetro. Además es obvio que como el hidrómetro tiene un peso constante a medida que disminuye la gravedad específica de la suspensión, el hidrómetro se hundirá más dentro de la suspensión (aumentando así la distancia L). Es preciso recordar también, que la gravedad específica del agua (o densidad) decrece a medida que la temperatura aumenta (o disminuye) de 4°C . Esto ocasiona adicionalmente un hundimiento mayor del hidrómetro dentro de la suspensión.

Como L representa la distancia de caída de las partículas en un intervalo de tiempo dado t , y la velocidad se puede definir en la ec. (6-2) como la distancia dividida por el tiempo, es evidente que la velocidad de caída de las partículas es:

$$v = \frac{L}{t}$$

Por consiguiente es necesario encontrar la profundidad L correspondiente a algún tiempo transcurrido t de forma que se pueda determinar la velocidad necesaria para utilizar en la ecuación de Stokes.

Para encontrar L , es necesario medir la distancia L_2 y varios valores de la distancia variable L_1 (referirse a la Fig. 6-2) utilizando una escala. A continuación, usar un cilindro de sedimentación graduado de sección transversal A conocida, sumergir dentro de él el bulbo del hidrómetro y determinar el cambio en la medición del cilindro. Esto permitirá determinar el volumen del bulbo del hidrómetro V_b . A continuación se puede calcular la longitud L en cm si L_1 y L_2 están en cm y V_b se encuentra en cm^3 , de la siguiente forma:

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left(L_2 - \frac{V_b}{A} \right) \quad (6-3)$$

El término $-V_b/A$ de la ec. (6-3) toma en consideración que la suspensión de suelo-agua se eleva una cantidad V_b/A cuando el hidrómetro se coloca en el cilindro de sedimentación. Así el centro de volumen se desplaza hacia arriba $\frac{1}{2}(V_b/A)$ de la ec. (6-3). Al dibujar una curva de las lecturas del hidrómetro (las cuales se relacionan con los valores correspondientes de L_1) contra L , se obtiene el valor de L para cualquier lectura del hidrómetro R . Realmente, como esta curva es esencialmente lineal, solamente se necesitan 3 puntos para establecer la curva R contra L . Como el hidrómetro 152H tiene dimensiones razonablemente dentro de los patrones, los valores de L pueden obtenerse una sola vez con proyección adecuada para la mayoría de los trabajos posteriores de mecánica de suelos, como se muestra en la Tabla 6-5.

La lectura del hidrómetro no debe ser corregida para su utilización en la ec. (6-3) excepto por el error de menisco (en una suspensión turbia, es necesario leer en la parte

superior del menisco). La razón para sólo tener en cuenta esta corrección en la determinación de la velocidad de caída consiste en que la lectura real de la distancia L que las partículas han recorrido es independiente de la temperatura, gravedad específica de la solución, o cualquier otro tipo de variable.

Si se conoce el diámetro de la partícula y el porcentaje de suelo que aún permanece en suspensión —el cual es en este caso el porcentaje de material más fino— se tiene suficiente información para dibujar la curva de granulometría.

El porcentaje más fino se relaciona directamente a la lectura de hidrómetro de tipo 152H ya que la lectura proporciona los gramos de suelo que aún se encuentran en suspensión directamente si la gravedad específica de suelo es de 2.65 g/cm³ y el agua se encuentra a una densidad de 1.00 g/cm³. El agente dispersante tendrá algún efecto sobre el agua y, adicionalmente la temperatura del ensayo deberá ser cercana a 20°C y la G_s de los granos de suelo seguramente no es 2.65; por consiguiente se necesita corregir la lectura real del hidrómetro para obtener la “lectura” correcta de los gramos de suelo todavía en suspensión en cualquier instante durante el ensayo.

La temperatura puede mantenerse como una variable de un solo valor utilizando un baño de agua de temperatura controlada (si existe la disponibilidad), pero esto es una conveniencia mas no una necesidad. El efecto de las impurezas en el agua y del agente dispersor sobre las lecturas del hidrómetro se puede obtener utilizando un cilindro de sedimentación de agua de la misma fuente y con la misma cantidad de agente dispersivo que se utilizó al hacer la suspensión agua-suelo para obtener la “corrección de cero”. Este cilindro de agua debe tenerse a la misma temperatura a la cual se encuentra la solución de suelo. Una lectura de menos de cero en el jarro o cilindro patrón de agua se registra como un valor negativo. Una lectura entre 0 y 60 se registra como un valor positivo. *Todas las lecturas se deben tomar desde la parte superior del menisco* en ambos cilindros tanto el patrón (con agua clara) como el que contiene la suspensión de suelo-agua (agua turbia).

Si la temperatura es demasiado alta en ambos cilindros, el que contiene el suelo y el patrón, la densidad del agua será igualmente menor y el hundimiento del hidrómetro será el mismo por ese concepto. Si ambos cilindros tienen la misma temperatura el efecto será igual; por consiguiente, es posible obtener en la Tabla 6-3 una corrección única de temperatura para utilizar en la suspensión agua-suelo. Como la corrección de cero es (\pm) y la corrección de temperatura es también (\pm) con el signo que indique la Tabla 6-3, la lectura corregida del hidrómetro para gramos de suelo en suspensión se calcula como:

$$R_c = R_{\text{real}} - \text{corrección de cero} + C_T$$

Una vez corregida la lectura del hidrómetro (sin incluir el hecho de que la gravedad específica de los sólidos puede diferir de 2.65), el porcentaje de material más fino puede calcularse por simple proporción (si $G_s = 2.65$) como:

$$\text{Porcentaje de material más fino} = R_c/W_s \times 100 \text{ por ciento} \quad (6-5)$$

donde: R_c = gramos de suelo en suspensión en un tiempo t dado [lectura corregida del hidrómetro utilizando la ec. (6.4).]

W_s = peso original de suelo colocado en la suspensión, g.

Si G_s no es igual a 2.65, es posible calcular una constante a para utilizar en la ec. (6-5) por proporción como sigue:

$$\frac{a}{G_s/(G_s - 1)} = \frac{1}{2.65/(2.65 - 1)}$$

Despejando a se tiene:

$$a = \frac{G_s(1.65)}{(G_s - 1)2.65} \quad (6-6)$$

El porcentaje más fino cuando $G_s \neq 2.65$, se calcula como:

$$\text{Porcentaje más fino} = R_c a / W_s \times 100 \text{ por ciento} \quad (6-7)$$

En la Tabla inicial 6-2 se dan valores típicos para a .

Cuando se trata de realizar cálculos, la ec. (6-2) se reescribe comúnmente utilizando L en cm y t en minutos para obtener D en mm como sigue:

$$D = \sqrt{\frac{30\eta}{980(G_s - G_w)} \frac{L}{t}} \quad (6-8)$$

que puede a su vez ser simplificada de la siguiente forma:

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad \text{mm} \quad (6-8a)$$

Como todas las variables menos L/t son independientes del problema *excepto por la temperatura* de la suspensión, es posible evaluar $K = f(T, G_s, u)$ de una sola vez, como se muestra en la Tabla 6-4.

Procedimiento *Esta es una práctica de grupo*

METODO A: Utilizar el siguiente procedimiento siempre que la muestra de suelo tenga entre 80 y 90% del material menor que el diámetro correspondiente al tamiz No. 200. Cuando menos cantidad de la muestra pase a través del tamiz No. 200 y/o se encuentre presente material superior en tamaño al tamiz No. 10, considere la utilización del método B que se da a continuación del presente.

1. Tomar exactamente 50 g de suelo secado al horno y pulverizado (como el que se utilizó en el análisis por tamizado) y mezclarlo con 125 ml de solución al 4% de NaPO₃.¹ Una solución de 4% de metafosfato de sodio puede hacerse mezclando 40 g de material seco con suficiente agua hasta completar 1000 ml. La solución debe ser siempre fresca y en ningún caso haber sido preparada con más de un mes de anterioridad.
2. Dejar asentar la muestra de suelo cerca de una hora (la ASTM sugiere 16 horas para suelos arcillosos, pero esto generalmente es innecesario). Transferir la mezcla al vaso de una máquina batidora de refrescos y añadir agua común² hasta llenar $\frac{2}{3}$ del vaso. Mezclarlo por espacio de 1 minuto si se emplearon entre 10 y 16 horas en la preparación de la muestra, de lo contrario mezclarlo entre 3 y 5 minutos.
3. Transferir el contenido del vaso de la batidora a un cilindro de sedimentación, teniendo mucho cuidado de no perder material en el proceso. Añadir agua común hasta completar la marca de 1000 ml de cilindro. Preparar el cilindro patrón de control (Fig. 6-1) con agua común y 125 ml de la solución de dispersante al 4% "o la misma que se utilizó en el paso No. 1". Verificar que la temperatura del agua común sea igual para ambos cilindros, el de sedimentación y el de control.
4. Tomar un tapón de caucho No. 12 (usar la palma de la mano si no hay un tapón disponible) para tapar la boca del cilindro donde se encuentra la suspensión de suelo y agitarla cuidadosamente por cerca de un minuto. Poner sobre la mesa el cilindro, remover el tapón, inmediatamente insertar el hidrómetro y tomar lecturas con los siguientes intervalos de tiempo:

1, 2, 3 y 4 minutos³

Tomar igualmente lectura del termómetro.

¹ Si se utiliza silicato de sodio (vidrio líquido) como agente dispersante, usar entre $\frac{1}{2}$ y 1 ml de solución concentrada con 125 ml de agua.

² La ASTM requiere agua destilada o demineralizada, pero sin embargo, se puede usar satisfactoriamente agua común pues ambos recipientes son iguales. El agente dispersivo produce "polución" sobre cualquier agua utilizada.

³ Nótese que de usarse el procedimiento sugerido por la ASTM, sería imposible tomar las primeras mediciones. La norma ASTM utiliza entre 100 y 120 g de suelo en suspensión por lo cual el hidrómetro no puede utilizarse hasta cuando haya sedimentado suficiente material, es decir, cuando solamente queden entre 50 y 60 g de suelo en suspensión.

Colocar el hidrómetro y el termómetro en el recipiente de control (el cual debe encontrarse a una temperatura que no difiera en más de 1°C del suelo). Tomar una lectura para corrección de menisco en el hidrómetro dentro del cilindro de control.

Es usual dejar el hidrómetro metido dentro de la solución de suelo durante las primeras dos mediciones, y luego removerlo y volverlo a colocar para cada una de las siguientes dos mediciones. Sin embargo, el error que se introduce al dejar el hidrómetro metido entre la suspensión durante las cuatro mediciones es mínimo. Es necesario evitar en lo posible la agitación de la suspensión cuando se coloca el hidrómetro dentro de ella, colocándolo tan suavemente como para requerir alrededor de 10 segundos en realizar dicha operación.

5. Reemplazar el tapón No. 12, volver a agitar la suspensión y volver a tomar otra serie de medidas a 1, 2, 3 y 4 min. Repetir tantas veces como se necesite con el fin de obtener dos juegos de mediciones que concuerden a la unidad en cada una de las cuatro mediciones. Si no se utiliza un baño estabilizador de temperatura, se puede continuar la práctica como se indica en el paso 6.

Si se utiliza un baño estabilizador de temperatura, es necesario agitar una vez más la suspensión, y colocarla junto con la solución control en el baño estabilizador de temperatura.

6. Tomar una medición a los 4 minutos dentro del baño estabilizador y compararla con las mediciones de 4 minutos anteriores, si existe suficiente concordancia entre dichas lecturas, es posible continuar el ensayo; de otra forma, es necesario volver a agitar y repetir el proceso hasta lograr dicha concordancia. Una vez que se haya logrado acuerdo en las medidas (hasta la unidad), se deben tomar medidas adicionales a los siguientes intervalos de tiempo:

8, 15, 30, 60 minutos, y 2, 4, 8, 16, 32, 64, 96 horas.

Los intervalos sugeridos para tomar mediciones después de 2 horas de comenzado el ensayo son sólo aproximados, ya que en realidad cualquier tiempo sería adecuado siempre y cuando sea tomado con suficiente espaciamiento para permitir una dispersión satisfactoria de los puntos en la gráfica.

Registrar la temperatura de la suspensión suelo agua con una precisión de 1°C para cada medición del hidrómetro.

La práctica puede terminarse antes de las 96 horas a discreción del instructor. Si no se han dado instrucciones especiales para la terminación, el experimento debe continuarse hasta que el tamaño de las partículas D que se encuentran en suspensión sea del orden de 0.001 mm (se debe hacer simultáneamente el cálculo).

Entre lectura y lectura del hidrómetro se debe guardar éste y el termómetro en el cilindro de control (el cual debe estar a la misma temperatura).

7. Pasar a la sección de "cálculos".

METODO B: Este método debe utilizarse para obtener el análisis mecánico e hidrométrico de suelos cuya fracción gruesa es apreciable. En realidad puede utilizarse para cualquier suelo, pero su duración es mucho mayor que el método A antes explicado y que el procedimiento del Experimento No. 5. Por esta razón para práctica de laboratorio estudiantil es preferible ejecutar por separado el Experimento No. 5 y/o el método A de este Experimento.

1. Secar al horno una cantidad adecuada de suelo sobre la base del máximo tamaño de agregado. Esta cantidad deberá variar entre 300 g y 1000 g más que las siguientes cantidades:

500 g si el máximo agregado de la muestra es de 10 mm o menos (peso total de la muestra)

5000 g para suelos cuyo máximo agregado tenga un tamaño de 75 mm o mayor.

Usar interpolación lineal y aproximar al millar mayor para diámetros intermedios.

Denominar W_o al peso real de la muestra de suelo— y usar 500, 1000, 2000 g, etc. Asegurarse de que la muestra total secada al horno sea mayor, e. g., para una muestra de 500 g secar al horno una muestra entre 700 y 1000 g. w_o será 500 g.

2. Lavar cuidadosamente la muestra W_o a través del tamiz No. 200 como se hizo en el Experimento No. 5 y secar los residuos al horno. Hacer un análisis mecánico utilizando entre 5-8 tamices escogidos desde el tamaño correspondiente al máximo agregado presente en la muestra y en la parte inferior un tamiz No. 50 y/o No. 100 y un tamiz No. 200. El hecho de que se escoja el No. 50 o No. 100 (o ambos) depende del tamaño de la serie necesaria para estimar la gradación del material.

Dibujar la curva granulométrica utilizando los pasos 1 al 9 del "procedimiento" en el Experimento No. 5. Dibujar la gráfica muy suavemente hasta este punto.

3. A partir de la curva de distribución dibujada, obtener el porcentaje de material más fino que los tamices No. 50 y No. 100. Utilizar el tamiz No. 100 si es necesario usar ambos. El tamiz No. 200 debe incluirse para verificar la eficiencia del lavado de la muestra. Llamar N_i al porcentaje de material más fino obtenido.
4. Obtener una muestra, representativa secada al horno y más pequeña a partir de la muestra grande secada al horno de un peso exacto W_t obtenido de la siguiente forma:

$$W_t = \frac{50}{N_i} \quad (\text{g})$$

donde N_i = porcentaje más fino decimal del paso 3. Esto producirá una muestra para hidrómetro entre 50 y 60 g, o sea en el rango de lectura del hidrómetro 152H y con todas sus partículas dentro del rango de validez de la ley de Stokes.

5. Pulverizar esta muestra tanto como se pueda y tamizar en seco a una bandeja a través del tamiz que se haya escogido como límite máximo de la fracción fina (50 ó 100). Guardar el material más fino en la bandeja. Recuperar el residuo de material más grueso y mezclarlo con agua en una cápsula o recipiente adecuado de porcelana hasta que se sature. Permitir a este material saturarse por espacio de varias horas (hasta 24) de forma que todos los grumos existentes se ablanden y disuelvan. A continuación, lavar el material saturado a través del tamiz sobre la bandeja que contenía el material que originalmente había pasado en seco. Utilizar tan poca agua como sea posible, pero suficiente para asegurar un lavado completo de la muestra. Guardar toda el agua (y suelo más fino) en un beaker o recipiente adecuado, dependiendo de la cantidad resultante, y dejarlo sedimentar.
6. Recuperar el residuo de material más grueso que no logró pasar a través del tamiz, secarlo al horno y obtener el peso seco de dicho residuo W_f . Utilizar el peso inicial seco W_t del paso 4 y repetir el paso 2 para obtener una nueva curva de distribución granulométrica. Dibujar suavemente esta nueva curva sobre la que se obtuvo en el paso 2. Nótese que solo por coincidencia muy feliz se lograrían dos curvas idénticas. Calcular W_s como:

$$W_s = W_t - W_f$$

7. Si el material lavado ocupa más de 1000 ml, es necesario dejar sedimentar por un tiempo la suspensión suelo-agua con el fin de decantar el agua limpia de la parte superior hasta obtener un volumen remanente entre 400 y 600 ml.
8. Transferir la suspensión suelo-agua al vaso de un mezclador eléctrico de refrescos y mezclarlo entre 5 y 10 minutos. Verter el material en un cilindro de sedimentación graduado de 1000 ml. Añadir 125 ml de agente dispersante en solución y suficiente agua común adicional para llenar el cilindro hasta la marca de 1000 ml. Asegurarse de no perder suelo en el proceso anterior, y de que el material que hubiese podido quedar dentro del vaso de la mezcladora sea removido completamente y transferido al cilindro de sedimentación.
9. Referirse al método inicial A, pasos 4 y siguientes para la conclusión del ensayo del hidrómetro.

Cálculos

(MÉTODOS A y B)

1. Aplicar la corrección de menisco a las lecturas de hidrómetro y entrar en la Tabla 6-5 para obtener los valores de L . Si G_s es desconocido (o suministrado por el instructor), suponer un valor razonable entre 2.68 y 2.74. Hacer una selección tal que impida interpolaciones innecesarias en cualquier suposición. Con G_s y la temperatura del ensayo para cualquier lec-

tura del hidrómetro, entrar en la Tabla 6-4 para obtener el valor correspondiente de K . Con los valores de K , L y el tiempo transcurrido t , para dichas lecturas, calcular los valores para D utilizando la ec. (6-8a). Utilizar la Fig. 6-3 y la "memoria de cálculos" como guías.

2. Utilizando un valor corregido de R_c de la ec. (6-4) en la ec. (6-7), calcular el porcentaje de material más fino correspondiente al diámetro de partícula D del paso 1.
3. Utilizar los datos del párrafo 1 y 2 anteriores para dibujar la curva de porcentaje más fino contra tamaño de partículas —bien sobre el formato donde se dibujaron las curvas del Experimento No. 5 (o la del Método B) o sobre un nuevo formato del suelo utilizado.

Note cuidadosamente que el porcentaje de finos es independiente de la cantidad de suelo utilizada de forma que el resultado del análisis de hidrómetro puede combinarse con el del análisis mecánico. Si esto se hace, se debe tener presente que el análisis mecánico utiliza una muestra mayor y debería por tanto dar un peso mayor cuando se dibuja la curva de distribución a través de la región discontinua entre las dos ramas de la curva. Si se utiliza el Método B se debe referir al párrafo 3b que se presenta a continuación.

Es preciso asegurarse de identificar adecuadamente (en una forma similar a la Fig. 5-4) los puntos obtenidos en el análisis mecánico de los obtenidos en el análisis de hidrómetro.

LOS SIGUIENTES CALCULOS DEBEN HACERSE UNICAMENTE SI SE UTILIZA EL METODO B:

3. (a) Comparar el porcentaje de material que pasa el tamiz utilizado para obtener la muestra de hidrómetro con el porcentaje del material más fino en la muestra W_o . ¿Tiene usted alguna explicación para esta diferencia en caso de ser menor que $\pm 2.5\%$, $\pm 5\%$; o cualquier porcentaje mayor? (b) Ajustar la parte de la curva de distribución obtenida por análisis mecánico para los dos juegos de datos de análisis mecánico utilizando un promedio pesado basado en los pesos de la muestra como sigue:

$$D_i = \frac{W_o \text{ (porcentaje más fino que } D_i \text{ (IV,)}) + W_t \text{ (% más fino } D_i \text{ (IV,)}}{W_o + W_t}$$

Dibujar estos valores ajustados del porcentaje de material más fino (cada uno de los cuales debe estar entre los dos valores registrados para el determinado tamaño de grano D_1) y dibujar la porción final de la curva de granulometría por análisis mecánico usando una línea fuerte.

4. Mostrar sobre la curva de ser posible, los valores de D_{85} , D_{60} , D_{30} y D_{10} . Para la rama de la curva obtenida mediante el ensayo del hidrómetro, muestre el porcentaje de arcilla.
5. Incluya en su informe lo siguiente:

- a. Derivar la ec. (6-8) a partir de la ec. (6-2); verificar igualmente la ec. (6-4).
- b. Comentar sobre el efecto de utilizar 60 mg o más de material y/o tener G_s mayor de 2.65, en lugar de la cantidad (aproximadamente 50 g) de suelo utilizado.
- c. ¿Por qué no es necesario hacer corrección de lectura de menisco en la ec. (6-4)?
- d. ¿Cuál es el efecto de utilizar una G_s errónea, por ejemplo, 2.68 cuando el valor correcto es 2.70?
- e. ¿Por qué C_C y C_U no tienen mayor importancia cuando más del 12% del material pasa a través del tamiz No. 200?
- f. Comentar dos usos adicionales para los datos del ensayo del hidrómetro.

Memoria de Cálculos

De la línea 1 de la Fig. 6-3 (formato típico)

$$R_c = R_a - \text{corrección de cero} + C_T \text{ (} C_T \text{ de la Tabla 6-3 a } 22^\circ\text{C)}$$

$$R_c = 49 - 3 + 0.40 = 46.4 \quad a = 0.99 \text{ (dcl formato)}$$

$$\text{Porcentaje más fino} = \frac{R_c a}{W_s} \times 100 = \frac{46.4 (0.99) (100)}{50.0} = 91.9 \%$$

Hidrómetro corregido por menisco solamente = $49 + 1 = 50$

$L = 8.1$ (de la Tabla 6-5 a $R = 50$)

$$v = \frac{L}{t} = \frac{8.1}{1} = 8.1$$

$K = 0.0131$ (de la Tabla 6-4 usando T y G_s)

$D = K\sqrt{L/t} = 0.0131\sqrt{8.1} = 0.037 \text{ mm}$ (No calcular más dígitos de los que pueden dibujarse usando una escala log.)

De la línea 3 del formato:

$$R_c = 43 - 3 + 0.4 = 40.4$$

$$\text{Porcentaje más fino} = \frac{40.4(0.99)(100)}{50.0} = 80.0\%$$

Hidrómetro corregido por menisco = $43 + 1 = 44$

$L = 9.1$ (de la Tabla 6-5)

$K = 0.0131$ (de la Tabla 6-4)

$$D = 0.0131\sqrt{9.1/3} = 0.023 \text{ mm}$$

De la última línea del formato

$$R_c = 10 - 3 + 1.0 = 8.0$$

$$\text{Porcentaje más fino} = \frac{8.0(0.99)(100)}{50.0} = 15.8\%$$

Hidrómetro corregido por menisco = $10 + 1 = 11$

$L = 14.5$ (de la Tabla 6-5)

$K = 0.0127$ (de la Tabla 6-4)

$$D = 0.0127\sqrt{14.5/2850} = 0.0009 \text{ mm}$$

ANALISIS GRANULOMETRICO – METODO DEL HIDROMETRO

Formato 7

Proyecto ANALISIS POR HIDROMETRO Trabajo No. ~

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~

Descripción del Suelo ARCILLA LIMOSA Parda Profundidad de la Muestra ~

Realizado por J.E.B Fecha de la práctica 3/4/76

Análisis del Hidrómetro

Hidrómetro No. 152H G_s de los sólidos = 2.72 $a = 0.99$ Agentes Dispersante NaPO₃ (Calgon) Cantidad 4g in 125 ml Peso de Suelo W_s 50.09

Corrección de cero + 3.0 Corrección del menisco 1.0

Fecha	Hora de la lectura	Tiempo transcurrido, min	Temp. °C	Lectura real del hidrómetro R_c	Lectura corregida del hidrómetro R_c	% más fino	Hidrómetro corregido por menisco R	L de la Tabla 6-5	L/t	K de la Tabla 6-4	D , mm
3-4	3:30 P.M.	1	22°	49	46.4	91.9	50	8.1	8.1	0.0131	0.037
		2		47	44.4	87.9	48	8.4	4.2		0.027
		3		43	40.4	80.0	44	9.1	3.03		0.023
		4		42	39.4	78.0	43	9.2	2.3		0.020
		8		37	34.4	68.1	38	10.1	1.26		0.015
		16		31	28.4	56.2	32	11.1	0.69		0.011
		30		26	23.4	46.3	27	11.9	0.597		0.0082
	4:30	60		24	21.4	42.4	25	12.2	0.203		0.0059
	5:35	125		21	18.4	36.4	22	12.7	0.102	0.0131	0.0042
	9:00	330	23°	18	15.7	31.1	19	13.2	0.040	0.0129	0.0026
3-5	8:00 A.M.	990	23°	16	13.7	27.1	17	13.5	0.014	0.0129	0.0015
	3:00 P.M.	1410	24°	14	12.0	23.8	15	13.8	0.0098	0.0127	0.0013
3-6	3:00 P.M.	2850	24°	10	8.0	15.8	11	14.5	0.0051	0.0127	0.0009
<hr/>											
LINEA 2: % MAS FINO = $\frac{44.4(0.99)(100)}{50} = 87.9\%$											
<hr/>											
$D = 0.0131 \sqrt{\frac{8.1}{2}} = 0.027 \text{ mm}$											
** CALCULAR D A 2 DIGITOS SIGNIFICATIVOS PARA LA GRAFICA.											

$$R_c = R_{real} - \text{corrección de cero} + C_r$$

$$\% \text{ más fino} = R_c (a) / W_s$$

$$D = K \sqrt{L/t}$$

Figura 6-3

Datos típicos del ensayo de hidrómetro. La gráfica de porcentaje de material más fino vs. D se muestra en la curva A de la Fig. 5-4.

Tabla 6-1 Propiedades del agua destilada.

Temp. (°C)	Peso unitario del agua (g/cm ³)	Viscosidad del agua (poises) ¹
4	1.00000	0.01567
16	0.99897	0.01111
17	0.99880	0.01083
18	0.99862	0.01056
19	0.99844	0.01030
20	0.99823	0.01005
21	0.99802	0.00981
22	0.99780	0.00958
23	0.99757	0.00936
24	0.99733	0.00914
25	0.99708	0.00894
26	0.99682	0.00874
27	0.99655	0.00855
28	0.99627	0.00836
29	0.99598	0.00818
30	0.99568	0.00801

$$\text{Poise} = \frac{\text{dina} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}$$

Tabla 6-2 Factores de corrección *a* para el peso unitario de sólidos.

Peso unitario de los sólidos del suelo (g/cm ³)	Factor de corrección <i>a</i>
2.85	0.96
2.80	0.97
2.75	0.98
2.70	0.99
2.65	1.00
2.60	1.01
2.55	1.02
2.50	1.04

Tabla 6-3 Factores de corrección por temperatura *C_T*

Temp. (°C)	c _T
15	-1.10
16	-0.90
17	-0.70
18	-0.50
19	-0.30
20	0.00
21	+0.20
22	+0.40
23	+0.70
24	+1.00
25	+1.30
26	+1.65
27	+2.00
28	+2.50
29	+3.05
30	+3.80

Tabla 6-4 Valores del *K* de la ecuación (6-8a) para varias combinaciones de pesos unitarios y temperaturas.

Temp. (°C)	PESO UNITARIO DE LOS SÓLIDOS DEL SUELO (g/cm ³)							
	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0.0151	0.0148	0.0146	0.0144	0.0141	0.0139	0.0137	0.0136
17	0.0149	0.0146	0.0144	0.0142	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134
18	0.0148	0.0144	0.0142	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132
19	0.0145	0.0143	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.0131
20	0.0143	0.0141	0.0139	0.0137	0.0134	0.0133	0.0131	0.0129
21	0.0141	0.0139	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127
22	0.0140	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0128	0.0126
23	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124
24	0.0137	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0125	0.0123
25	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0122
26	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0124	0.0122	0.0120
27	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120	0.0119
28	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0123	0.0121	0.0119	0.0117
29	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0121	0.0120	0.0118	0.0116
30	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120	0.0118	0.0117	0.0115

Tabla 6-5 Valores de L (profundidad efectiva) para usar en la fórmula de Stokes en la determinación de diámetros de partículas con el hidrómetro ASTM 152H.

Lectura original del hidrómetro (corregida por menisco solamente)	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura original del hidrómetro (corregida por menisco solamente)	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura original del hidrómetro (corregida por menisco solamente)	Profundidad efectiva L (cm)
0	16.3	21	12.9	42	9.4
1	16.1	22	12.7	43	9.2
2	16.0	23	12.5	44	9.1
3	15.8	24	12.4	45	8.9
4	15.6	25	12.2	46	8.8
5	15.5	26	12.0	47	8.6
6	15.3	27	11.9	48	8.4
7	15.2	28	11.7	49	8.3
8	15.0	29	11.5	50	8.1
9	14.8	30	11.4	51	7.9
10	14.7	31	11.2	52	7.8
11	14.5	32	11.1	53	7.6
12	14.3	33	10.9	54	7.4
13	14.2	34	10.7	55	7.3
14	14.0	35	10.5	56	7.1
15	13.8	36	10.4	57	7.0
16	13.7	37	10.2	58	6.8
17	13.5	38	10.1	59	6.6
18	13.3	39	9.9	60	6.5
19	13.2	40	9.7		
20	13.0	41	9.6		

Experimento N° 7

GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS DEL SUELO

Referencias

AASHTO T100-70
ASTM D854-58

Objetivo

Familiarizar al estudiante con el método general de obtención de la gravedad específica de la masa de cualquier material compuesto por partículas pequeñas cuya gravedad específica sea mayor que 1.00. Esta práctica es aplicable específicamente a suelos y agregados finos (o arenas) como los utilizados en mezclas de concreto y asfalto.

Equipo

Frasco volumétrico, preferiblemente de 250 ó 500 ml (ver Fig. 7-1).

Bomba de vacío o aspirador para producir vacío.

Mortero y mango para mortear

Balanza de precisión 0.1 g

Suministro de agua desaireada con temperatura estabilizada¹

Opcional: recipiente de agua helada y mezclador mecánico (de refrescos).

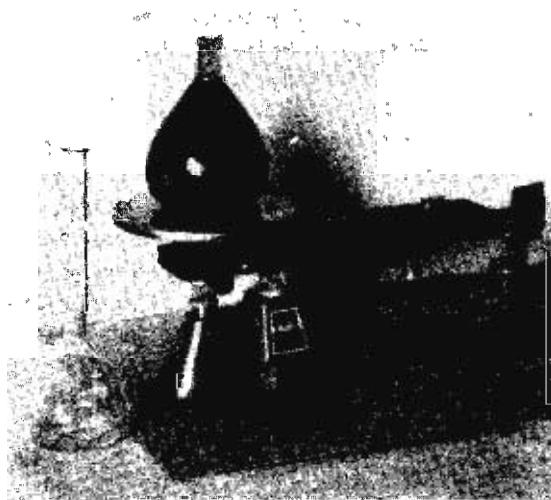


Figura 7-1

Balanzas y frasco volumétrico (se muestra el de 500 ml) para el ensayo de gravedad específica. Se muestra la determinación del peso W_{bws} , después de desairear cuidadosamente la suspensión de suelo-agua.

¹ Con anterioridad a la clase, se debe recolectar y desairear una cantidad suficiente de agua común (o destilada), cerca de 1000 ml por grupo; utilizar agua común, agua caliente, y/o agua helada para efectuar una estabilización en la temperatura del agua. Verificar además y secar al horno los frascos volumétricos si se considera necesario.

Discusión Exposición General

La gravedad específica G_s de un suelo sin ninguna calificación¹ se toma como el valor promedio para los *granos del suelo*. Si en desarrollo de una discusión no se aclara adecuadamente a qué gravedad específica se refieren algunos valores numéricos dados, la magnitud de dichos valores puede indicar el uso correcto, pues la gravedad específica de los granos del suelo es siempre bastante mayor que la gravedad específica volumétrica determinada incluyendo los vacíos de los suelos en el cálculo [bien llenos de aire (secos) o llenos de agua parcial o totalmente].

El valor de la gravedad específica es necesario para calcular la relación de vacíos de un suelo, se utiliza también en el análisis de hidrómetro y es útil para predecir el peso unitario del suelo. Ocasionalmente el valor de la gravedad específica puede utilizarse en la clasificación de los minerales del suelo; i. e., algunos minerales de hierro tienen un valor de gravedad específica mayor que los provenientes de sílica.

La gravedad específica de cualquier sustancia se define como el peso unitario del material en cuestión dividido por el peso unitario del agua destilada a 4°C. Así, si se consideran solamente los granos del suelo se obtiene G_s como:

$$G_s = \frac{\gamma_{\text{material}}}{\gamma_{\text{agua a } 4^{\circ}\text{C}}} \quad (7-1)$$

La misma forma de ecuación se utiliza para definir la gravedad específica del conjunto, la única diferencia en esa definición es el $\gamma_{\text{del material}}$. La gravedad específica del material puede también calcularse utilizando cualquier relación de peso de la substancia al peso del agua siempre y cuando se consideren volúmenes iguales de material y substancia:

$$G_s = \frac{W_{st}/V}{W_{uw}/V} \quad (7-2)$$

Es evidente en la ec. (7-2), que esto es cierto ya que los términos de volúmenes se cancelan. Nótese, sin embargo, que si no se cancela V en la ec. (7-2), se obtiene la ec. (7-1).

El problema consiste en obtener el volumen de un peso conocido de granos de suelo y dividirlo por el peso del mismo volumen de agua, es decir, aplicar la ec. (7-2), pues esta forma es más difícil de captar como también de evaluar en el laboratorio. El volumen de un peso conocido de partículas de suelo puede obtenerse utilizando un recipiente de volumen conocido y el principio de Arquímedes, según el cual un cuerpo sumergido dentro de una masa de agua desplaza un volumen de agua igual al del cuerpo sumergido.

El recipiente de volumen conocido es el frasco volumétrico el cual mide un volumen patrón de agua destilada a 20°C. A temperaturas mayores, el volumen será ligeramente mayor; a temperaturas menores de 20°C el volumen será ligeramente menor. Como el cambio sufrido en el volumen es pequeño para desviaciones de temperaturas pequeñas en el fluido, y además es relativamente fácil mantener la temperatura de ensayo cercana a los 20°C, es posible aplicar una corrección aproximada de temperatura para desviaciones pequeñas de temperatura en los cálculos del ensayo, que permita una aproximación satisfactoria sin necesidad de recurrir a determinar experimentalmente el cambio en el contenido volumétrico del frasco con la temperatura. Alternativamente, se puede desarrollar una curva de calibración para cualquier frasco volumétrico dado de la siguiente forma:

1. Limpiar cuidadosamente el frasco
2. Llenar con agua destilada demineralizada o común el frasco a temperaturas conocidas.
3. Hacer una gráfica del peso (W_{bw}) contra $T^{\circ}\text{C}$ (usar mínimo 4 puntos a, por ejemplo, 16, 20, 24 y 28°C).

¹ Algunos textos utilizan el símbolo G_s para indicar la gravedad específica de los granos del suelo; otros utilizan el símbolo G . El autor prefiere el símbolo G_s .

A menudo para este experimento se utiliza agua común en lugar de agua destilada (por lo menos en el trabajo de rutina): el error, también en este caso, es bastante pequeño. Es posible determinar el error introducido al usar agua común, de la siguiente forma: se llena el frasco volumétrico hasta la marca, y se obtiene la temperatura y el peso; si se resta de este dato el peso del frasco volumétrico vacío, es posible determinar la densidad del agua común y compararla con la densidad del agua destilada a la temperatura adecuada en Tablas como la Tabla 6-1. Nótese que si la temperatura no es exactamente 20°C es necesario para determinar el volumen del frasco recurrir a una calibración como la que se ha sugerido. Generalmente, si el error de densidad es menor que 0.001, puede ser despreciado.

Como el método de trabajo del laboratorio para determinar la gravedad específica del suelo utilizando un frasco volumétrico es en realidad un método indirecto (se desplaza indirectamente el volumen del material), se derivará a continuación una expresión para calcular la gravedad específica:

1. Sea W_b = peso del frasco volumétrico vacío (y seco).
2. Sea W_{bw} = peso de la botella más agua destilada o agua común hasta la marca del frasco volumétrico.
3. Colocar el peso de sólidos seco W_s en el frasco y nuevamente llenar el frasco hasta la marca de volumen y pesarlo. Sea este valor W_{bws} .
4. Si el agua no fuera desplazada dentro de la botella por los sólidos de suelo, cuando se le añade W_s , el peso total debería ser:

$$W_T = W_{bw} + W_s$$

como el agua es reemplazada (es decir, una cantidad igual a W_{bw} no puede añadirse a la botella debido a que W_s ocupa parte de su volumen), al completar el volumen del frasco, el peso del agua que ha sido desplazada por las partículas de suelo y no cabe ahora en la botella será:

$$W_w = W_T - W_{bws} = W_{bw} + W_s - W_{bws}$$

5. De la definición de G_s en la ec. (7-2), y si no se considera un cambio en la densidad (ni en volumen) con la temperatura, la gravedad específica es:

$$G_s = \frac{W_s}{W_w}$$

pues se involucran volúmenes iguales.

Es posible escribir lo anterior de la siguiente forma:

$$G_s = \frac{W_s}{W_{bw} + W_s - W_{bws}}$$

Puede obtenerse un incremento pequeño en precisión si se tiene en cuenta el efecto de la temperatura sobre la densidad del agua expresando la ec. (7-3) de la siguiente forma:

$$G_s = \frac{\alpha W_s}{W_{bw} + W_s - W_{bws}} \quad (7-3)$$

donde α , la corrección de temperatura, se calcula como:

$$\alpha = \frac{\gamma_T}{\gamma_{20^\circ C}} \quad (7-4)$$

y es la relación entre los pesos unitarios del agua a la temperatura T del ensayo y a 20°C de tal forma que el valor de G_s obtenido a la temperatura T (que será muy grande si T es

mayor que 20°C) se reduce adecuadamente. Nótese que α es también G_w del agua a la temperatura del ensayo T .

Los siguientes son valores típicos para el factor de corrección α :

T, °C	α	γ_{wg} g/cm ³
16	1.0007	0.99897
18	1.0004	0.99862
20	1.0000	0.99823
22	0.9996	0.99780
24	0.9991	0.99732
26	0.9986	0.99681

La fuente más seria de error en la determinación experimental de la gravedad específica no es ni la temperatura (especialmente si la temperatura del ensayo se mantiene entre 18°C y 22°C) ni la utilización de agua común. La mayor fuente de error proviene de la inadecuada deaireación de la mezcla suelo-agua. El agua contiene, en condiciones normales, aire disuelto. Las partículas de suelo también contienen aire, y si este aire no se remueve de ambos materiales, el volumen de aire produce una disminución en el peso W_{bws} bastante grande. Lo cual da un menor valor de G_s , ya que $W_{bw} + W_s - W_{bws}$ resulta mayor otra fuente de error, que puede ser importante, es la utilización de balanzas desajustadas o la práctica de pesar en diferentes balanzas durante el ensayo.

Se puede lograr la deaireación adecuada de la mezcla suelo-agua aplicando vacío y/o calentamiento. El vacío sólo es normalmente suficiente para arenas, limos y arcillas. En suelos orgánicos, es aconsejable dejar hervir cerca de 30 minutos la mezcla suelo-agua, añadiendo agua a medida que se necesite para mantener el frasco volumétrico medio lleno.

El intervalo de tiempo de aplicación del vacío puede variar entre unos pocos minutos y

- 6 a 8 hrs. para suelos plásticos
- 4 a 6 hrs. para suelos de baja plasticidad

La eficiencia de la remoción de aire puede mejorarse para cualquier suelo haciéndolo hervir durante 10 minutos y teniendo suficiente cuidado de que la muestra no se seque completamente o que el material salpique fuera del frasco. El desaireamiento puede verificarse de la siguiente forma:

- (1) Aplicando vacío al frasco lleno entre la mitad y los $\frac{3}{4}$ con la mezcla suelo agua, por un tiempo; a continuación
- (2) Llenando el frasco hasta unos 20 mm por debajo de la marca del frasco con agua *deaireada* y con temperatura estabilizada.
- (3) Volviendo a aplicar el vacío por varios minutos y marcando con un lápiz de color adecuado el nivel del agua en el cuello del frasco.
- (4) Retirando cuidadosamente la tapa para romper el vacío y, si el nivel de agua sube más de 3 mm, el desaireamiento será suficiente.

A continuación se presentan valores típicos de G_s que pueden ser utilizados como guía para calibrar los resultados de ensayos de laboratorio:

Tipo de Suelo	G_s
Arena	2.65-2.67
Arena limosa	2.67-2.70
Arcilla inorgánica	2.70-2.80
Suelos con micas o hierro	2.75-3.00
Suelos orgánicos	Variable, puede ser inferior a 2.00

Procedimiento

1. Mezclar entre 100 y 120 g (el peso exacto no es importante en este punto) de suelo seco al aire con agua en un recipiente evaporador hasta formar una pasta cremosa. Si no se utiliza un mezclador eléctrico, remojar el suelo entre 20 y 30 minutos (la ASTM sugiere 12 hrs. para muestras secadas al horno).
2. Opcional: transferir la pasta al vaso del mezclador eléctrico de refrescos y añadir agua hasta formar una mezcla de cerca de 200 ml de suelo-agua. Batir estas mezclas durante 5 a 10 minutos. Si se hace este paso, es necesario utilizar un frasco volumétrico de 500 ml.
3. Pesar el frasco volumétrico vacío, a continuación llenar el frasco hasta la marca con agua deaireada, tener mucho cuidado en no introducir aire nuevamente al agua por agitación excesiva. Como alternativa, es posible aplicar vacío por unos cuantos minutos después de haber llenado el frasco hasta $\frac{3}{4}$ de su capacidad. Cuando el nivel de agua se encuentra en la marca volumétrica (no el menisco) y el cuello por encima de esa marca se encuentra totalmente seco, pesar el frasco y registrar el peso W_{bw} . Registrar la temperatura de forma que la mezcla agua suelo se encuentre a la misma temperatura aproximadamente dentro de 1°C. Esta operación puede hacerse mientras el suelo se encuentra en saturación o está siendo mezclado con la batidora eléctrica. Este paso se puede omitir si existe una curva de calibración para el frasco.
4. Luego de 15 a 30 minutos, transferir el suelo saturado del plato evaporador al frasco volumétrico. Tener cuidado de que no queden partículas de suelo en el recipiente evaporador. Añadir suficiente agua con temperatura estabilizada para completar $\frac{2}{3}$ a $\frac{3}{4}$ de la capacidad del frasco volumétrico. No se debe llenar completo debido a que la eficiencia del trabajo del vacío en la deaireación se puede reducir marcadamente.
5. Conectar el frasco a un ducto de vacío por un espacio de por lo menos 10 minutos. Durante este tiempo agitar suavemente la mezcla moviendo cuidadosamente la botella. Observar que la reducción en la presión del aire dentro del frasco produce "la ebullición" del agua (ver Fig. 7-2). Verificar la eficiencia del vacío en la forma descrita en la "discusión general". Si al final del período no se ha extraído totalmente el aire, se debe dejar sedimentar la solución, por espacio de unos pocos minutos de forma que se aclare el agua superficial y se pueda extraer suficiente para permitir que el vacío trabaje eficientemente. Este paso puede tomar varias horas, sin embargo, en laboratorios para estudiantes, el instructor ordenará continuar con el paso siguiente después de un tiempo razonable.

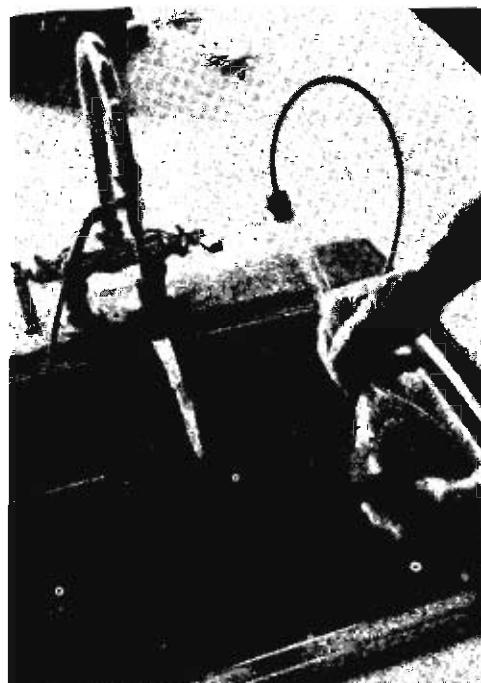


Figura 7.2

Suministro de vacío para deairear la suspensión suelo-agua utilizando un aspirador conectado al grifo. La intensidad del vacío depende del flujo a través del ducto. Nótese que el frasco está lleno hasta los dos tercios y su contenido "ebulle" (se aprecian burbujas y espuma dentro del frasco). Cuando se use este método *debe tenerse el cuidado de destapar el frasco antes de cerrar el grifo* de forma que se evite la entrada de agua al frasco debido al gran diferencial de presión entre el aspirador y el tubo de salida.

GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS (G_s)

Formato 8

Proyecto EXP. No 7 Trabajo No. ~

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~

Descripción del Suelo ARCILLA LIMOSA PARDIA Profundidad de la Muestra ~

Realizado por J.E.B Fecha de la práctica 12-3-75

Práctica No.	1	2	
Vol. del frasco a 20°C	500 ml.	500 ml.	
Método de remoción del aire ^a	VACIO	ASPIR.	
Peso frasco + agua + suelo = W_{bws}	753.66	754.69	
Temperatura, °C	23°	23°	
Peso frasco + agua ^b = W_{bw}	693.27	693.27	
Plato evaporador No.	5	4	
Peso plato evap. + suelo seco	350.11	368.49	
Peso del plato evap.	254.52	270.52	
Peso del suelo seco = W_s	95.59	97.97 g	
$W_s = W_s + W_{bw} = W_{bws}$	35.20	36.55	
$G_s = \alpha W_s / W_{bw}$ (0.99756)	2.71	2.67	

^a Indicar si se usó vacío o aspiradora para la extracción del aire.^b W_{bw} es el peso del frasco lleno con agua a la misma temp. $\pm 1^\circ\text{C}$ a la cual se registró W_{bws} o un valor tomado de la curva de calibración a la temperatura T de W_{bws} .

Observaciones $\% = \frac{2.71}{2.67} = 1.01 < 1.02 \text{ O.K.}$

Gravedad específica promedio de los sólidos del suelo (G_s) = 2.69

Figura 7-3

Datos de un ensayo de gravedad específica (dos intentos).

6. Cuando el proceso de deaireamiento se haya completado (o terminado), se debe añadir cuidadosamente agua hasta que la base del menisco se encuentre exactamente en la marca del frasco volumétrico. Se debe hacer esta operación con mucho cuidado para no reintroducir aire en el frasco. El agua utilizada debe provenir de un suministro deaireado, y con temperatura estabilizada. Se debe a continuación secar cuidadosamente el cuello del frasco por encima de la marca de calibración con un papel enrollado o por algún método similar.
7. Pesar la botella y su contenido con una aproximación de 0.01 g (estimado) para obtener W_{bws} . Asegurarse de que la temperatura se encuentra dentro de 1°C de la temperatura utilizada para obtener W_{bw} (a menos que se utilice una curva de calibración).
8. Vaciar el frasco volumétrico y su contenido en un plato evaporador profundo u otro recipiente similar y secarlo al horno. *Es necesario tener mucho cuidado de no perder nada de suelo en este proceso.* Pesar el suelo secado al horno para obtener W_s .
9. Calcular G_s utilizando la ec. (7-4). Comparar la densidad del agua utilizada con la del agua destilada, y hacer comentarios en un informe sobre el efecto de la utilización de agua común.
10. Repetir la secuencia sugerida (pasos 1 a 9) para valores adicionales de G_s hasta tener valores dentro de un rango de 2% definido de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Mayor valor de } G_s}{\text{Menor valor de } G_s} \leq 1.02$$

Luego de obtenido este par de valores G_s , obtener su promedio, redondear a la 0.01 más cercana y registrar este valor como el G_s del suelo.

Experimento N° 8

CLASIFICACION DE SUELOS

Referencias

- AASHTO (1971 o edición posterior). Especificaciones M145-66: La Clasificación de Suelos y Mezclas de Agregados de Suelo para Propósitos de Construcción de Carreteras, "Materiales de Carreteras", Vol. 1.
- Casagrande, A., (1948), Clasificación e Identificación de Suelos, *Transactions, ASCE*, Vol. 113, pp. 901-991.
- Highway Research Board (1945), Clasificación de Materiales para Subrasantes de Carreteras, *Proceedings*, Vol. 25, pp. 376-392.
- Wagner, A. A. (1957), El Uso del Sistema de Clasificación Unificada por la Oficina de Reclamaciones, *Proc. 4a. Conf. Int. de Mec. Suelos e Ing. de Fund.* Londres, Vol. 1. pp. 125-134.

Objetivo

Introducir al estudiante a 2 métodos de clasificación de suelos. El estudiante obtiene beneficios secundarios al obtener práctica adicional en la hechura de prácticas de suelos requeridas para hacer la clasificación.

Equipo

El requerido.

Exposición General

Existen varios métodos de clasificación de suelos — el conocido como Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el de la Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transportes (AASHTO), el Sistema del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), el Sistema de la ASTM y el Sistema de la Agencia Federal de Aviación (FAA) para nombrar sólo unos cuantos. Actualmente, los departamentos estatales de transporte (antiguos departamentos de carretera) utilizan el sistema de clasificación de la AASHTO. El ingeniero de fundaciones acostumbra hacer una inspección visual como base primaria de clasificaciones, pero su terminología, la cual no debe considerarse aquí, es muy similar a la del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

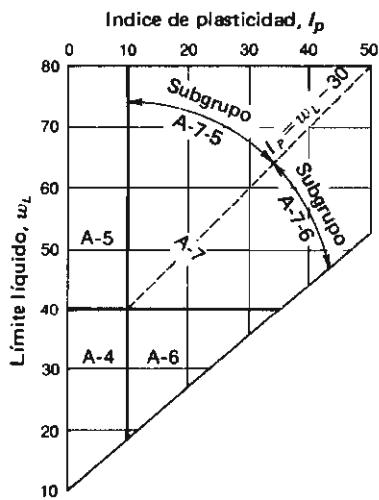
Todos los sistemas de clasificación de interés primordial para el ingeniero geotécnico utilizan los límites de Atterberg (por lo menos los límites líquido y plástico) con un análisis parcial o total de granulometría, y el proceso de eliminación para la clasificación de un suelo.

En todos los sistemas de clasificación es absolutamente esencial acompañar el símbolo de clasificación con la descripción debida del suelo, pues el símbolo particular de grupo es demasiado amplio y general como criterio de clasificación para suelos específicos.

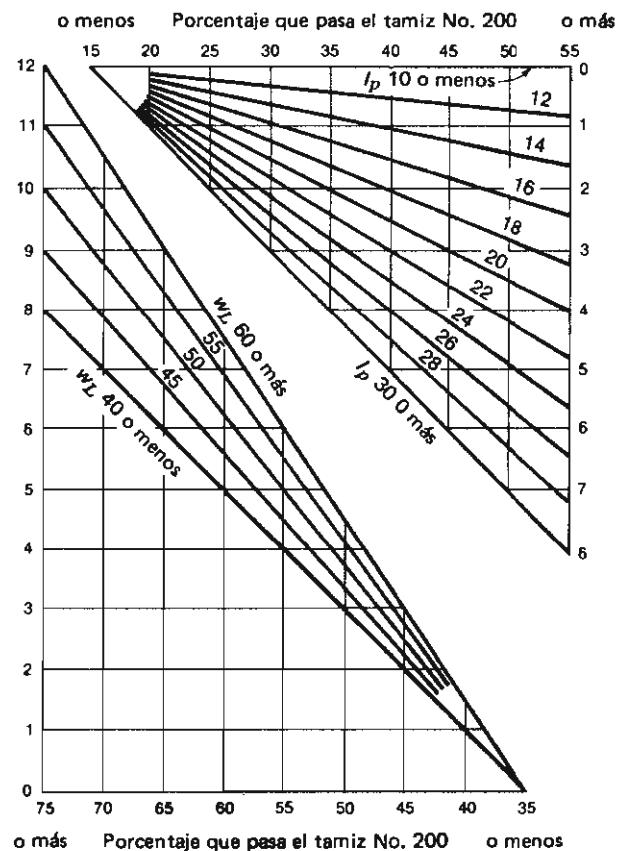
Clasificación General	Materiales Granulares (35 % o menos del total pasa el tamiz No. 200)						Materiales limo-arcillosos (más del 35 % del total pasa el tamiz No. 200)			
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7			A-7-5 ^a A-7-6
Porcentaje de material que pasa el tamiz No. 10			50 max							
No. 40	30 max	50 max	51 min							
No. 200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Características de la fracción que pasa el tamiz No. 40				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	41 min
Límite líquido, w_L			6 max	NP	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	11 min
Índice Plástico, I_p										11 min
Índice de Grupo ^b	0	0	0			4 max		8 max	12 max	16 max
										20 max

^aVer Fig. 8-1b^bÍndice de Grupo = $IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01 bd$ (Ver Fig. 8-1c)

(a) Sistema de clasificación AASHTO



(b) Rangos de límite líquido e índice de plasticidad para los grupos de suelos A-4, A-5, A-6 y A-7.

(c) Cuadro para obtener el índice de grupo del suelo.
El índice de grupo es igual a la suma de las dos lecturas en las escalas verticales.Figura 8-1
Cuadros para utilización en el sistema de clasificación AASHTO.

Debido a que existe mucha similaridad entre los diferentes métodos y a que los métodos de clasificación de suelos unificado y AASHTO, son los más ampliamente usados, esta práctica de laboratorio tendrá en cuenta solamente estos dos sistemas.

A. EL SISTEMA DE CLASIFICACION DE SUELOS DE LA AASHTO

La Fig. 8-1a muestra el sistema de clasificación de la AASHTO en la conveniente forma de tabla. La Fig. 8-1b provee una forma de utilizar los límites plástico y líquido para obtener la clasificación de los suelos entre los grupos A-4 y A-7, para los cuales el hecho de tener mas de un 35% de material más fino que el tamiz No. 200, es un factor esencial de clasificación. Este factor puede también utilizarse para obtener la clasificación de subgrupo de los suelos titulados A-2, para los cuales el hecho de tener *menos del 35% del material más fino que el tamiz No. 200*, es un factor esencial de clasificación. La designación de los subgrupos en el grupo A-2 se logra determinando si el suelo es A-2 clasificado de acuerdo con su análisis granulométrico, pero tiene propiedades plásticas (w_L y w_P) características de los suelos A-4, A-5, A-6 ó A-7. La Fig. 8-1a se utiliza procediendo de izquierda a derecha hasta encontrar el primer tipo de suelo que tenga las propiedades del suelo en consideración. El suelo tipo A-8 (no se muestra) se clasifica visualmente como turba (*material excesivamente orgánico*).

El sistema de clasificación de la AASHTO utiliza además un índice de grupo para comparar diferentes suelos dentro de un mismo grupo. El índice de grupo se calcula de acuerdo con la ec. (8-1) o a partir de la Fig. 8-1c. El índice encontrado de esa forma se redondea al entero siguiente y se reemplaza entre paréntesis después del número de clasificación correspondiente de la siguiente forma:

A-2-6(3)

clasificando de esta forma el suelo como un material del grupo A-2 con propiedades plásticas del grupo A-6 y con un índice de grupo de 3. El índice de grupo IG es una modificación de la AASHTO a la clasificación original BPR¹, como se indicó antes, para establecer una categoría dentro de la clasificación de grupo. Si dos suelos de un mismo grupo tienen diferente índice de grupo, tendrá mejor comportamiento como material de carretera aquél cuyo índice de grupo sea menor; esto es, un A-2-6 (2) debe ser un mejor material de carretera que un A-2-6 (4).

La ecuación para establecer el índice de grupo es la siguiente:

$$GI = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd \quad (8-1)$$

donde a = porcentaje de material más fino que el tamiz No. 200 mayor que el 35% pero menor que el 75%, expresado como un número entero positivo ($1 \leq a \leq 40$).

b = porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200 mayor que 15% pero menor que 55%, expresado como un número positivo entero ($1 \leq b \leq 40$).

c = porción del límite líquido mayor que 40 pero no mayor que 60, expresada como un número positivo entero ($1 \leq c \leq 20$).

d = porción del índice de plasticidad mayor que 10 pero no excedente a 30, expresado como un número positivo entero ($1 \leq d \leq 20$).

Como esta ecuación es lineal, se ve fácilmente que la parte superior de la Fig. 8-1c, resuelve el término $0.01 bd$ y que la parte inferior de la Fig. resuelve el término $0.2 a + 0.005 ac$ de la ec. (8-1). De forma que la suma de los valores obtenidos de las dos partes del cuadro redondeada al siguiente entero positivo constituye el índice de grupo IG del suelo.

¹ La clasificación original de la oficina de carreteras públicas (BPR) se introdujo en 1929. La designación del sistema AASHTO se introdujo alrededor de 1945.

Para ilustrar el método de clasificación por el procedimiento de la AASHTO, se clasifican los siguientes tres suelos:

Tamiz No.	% DE SUELO MAS FINO		
	A	B	C
4	—	—	69.3
10	68.5	79.5	59.1
20	—	—	48.3
40	36.1	69.0	38.5
60	—	—	28.4
100	—	—	19.8
200	21.9	54.3	5.1

Propiedades plásticas			
$w_L =$	34.1	53.5	No plástico (NP)
$w_P =$	16.5	31.6	
Descripción visual	Arcilla arenosa y limosa, parda clara	Arcilla limosa, trazos de grava, parda oscura	Arena muy gravosa gruesa, parda media

Para clasificar el suelo A:

1. Calcular el índice de plasticidad $I_p = w_L - w_P$

$$I_p = 34.1 - 16.5 = 17.6 > 10$$

Por consiguiente, el valor de $I_p >$ el mínimo de 11 controla.

2. Como el 21.9% del material pasa a través del tamiz No. 200 el suelo pertenece al grupo A-2, cuyo subgrupo debe ser determinado a partir del valor de I_p y w_L .
3. Si se procede sobre la Fig. 8-1a de izquierda a derecha:

$$w_L = 34.1 < 40 \quad \text{e} \quad I_p = 17.6 > 11$$

el primer suelo que satisface dichos criterios es el A-2-6.

4. A continuación se debe calcular el índice de grupo IG el cual en general no debe ser superior a 4 para ningún suelo A-2. Para este suelo se calcula el índice de grupo y se obtiene el valor correspondiente de la Fig. 8-1c. Si se utiliza para calcular los términos la ec. (8-1).

$a = 0$, pues menos del 35% del material pasa a través del tamiz No. 200.

$b = 21.9 - 15.0 = 6.9$ (definido en la ec. 8-1).

$c = 0$ ya que w_L es menor que 40.

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

$$IG = 0.2(0) + 0.005(0)(6.9) + 0.01(6.9)(7.6) = 0.52$$

y redondeando al entero más cercano se obtiene que $IG = 1$.

De la Fig. 8-1c, se obtiene que el IG es aproximadamente 0.6 de la parte superior de la carta y 0 de la parte inferior, sumando:

$$GI = 0.6 + 0 = 1$$

La clasificación del suelo A es:

Arcilla limosa y arenosa color pardo claro: A-2-6 (1)

Para clasificar el suelo B:

1. El índice de plasticidad es:

$$I_p = 53.5 - 31.6 = 21.9 > 10, \text{ por consiguiente, el mínimo de 11 controla.}$$

2. El porcentaje de material más fino que el tamiz No. 200 es $54.3 > 35$, por consiguiente, el suelo es un A-4, A-5, A-6 ó A-7.

3. Con $w_L = 53.5$ e $I_p = 21.9$ el suelo es A-7, pero debe aún encontrarse si se trata de un A-7-5 o un A-7-6. La simple inspección visual de la Fig. 8-1b muestra que la resolución de la escala es muy pequeña, por consiguiente es necesario calcular las coordenadas:

$$I_p = 21.9$$

$$w_L - 30 = 53.5 - 30 = 23.5 = I_p \text{ de línea a } w_L = 53.5\%$$

Como $21.9 < 23.5$, las coordenadas del gráfico se encuentran en la zona A-7-5, y por consiguiente así será el suelo. Debe a continuación calcularse el índice de grupo utilizando la Fig. 8-1c.

4. De la Fig. 8-1c se obtiene 5.2 de la parte inferior del cuadro y 4.3 de la parte superior de la carta para índice de grupo de:

$$IG = 5.2 + 4.3 = 9.5, \text{ utilizar } 10$$

La clasificación final del suelo B es:

Arcilla limosa, con trazas de grava; pardo oscura, A-7-5 (10)

Para clasificar el suelo C:

1. Para el suelo C se encuentra por eliminación rápida que debe pertenecer a los grupos A-1 ó A-3. El porcentaje del material que pasa a través del tamiz No. 40 es $28.5 < 51$ pero $38.5 > 30$, por consiguiente, debe ser A-1b. No existe índice de grupo para este suelo.

La clasificación final del suelo C es:

Arena gruesa muy gravosa; color pardo mediano; A-1b.

B. SISTEMA DE CLASIFICACION UNIFICADA DE SUELOS

Los elementos esenciales del sistema de clasificación fueron propuestos inicialmente por Arturo Casagrande (1942) y adoptados subsecuentemente por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos para la construcción de aeropuertos. Actualmente, este sistema se utiliza con modificaciones mínimas en la mayoría de los países fuera de los Estados Unidos. Dentro de los Estados Unidos el sistema es ampliamente utilizado por organizaciones tales como el Cuerpo de Ingenieros, la Oficina de Reclamos, y con pequeñas modificaciones por la mayoría de las firmas consultoras.

La Tabla 8-1 presenta los factores a considerar en la clasificación de un suelo de acuerdo con el sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Básicamente un suelo es:

El material se considera grueso si se retiene más del 50%	No. 200	El material se considera fino si pasa más del 50%
es retenido	0.075 mm	pasa
Grava	Arena	Limo o Arcila
Si más del 50% de la fracción gruesa queda retenida en tamiz No. 4	Si más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4	El suelo fino es: Limo (M) Arcilla (C) Orgánico (O)

A continuación se consideran estas subdivisiones en más detalle:

1. Gravas o arenas son:

GW, GP, SW o SP

si menos del 5% del material pasa a través del tamiz No. 200; G = grava; S = arena; W = bien gradada; P = pobemente gradada. La designación bien gradada o pobrememente gradada depende de dos valores característicos para C_u y C_c definidos en el Experimento No. 5 y con valores numéricos como se muestra en la Tabla 8-1.

2. Gravas y arenas son:

GM, GC, SM o SC

Tabla 8-1 Sistema unificado de clasificación

Divisiones mayores		Símbolo de grupo	Nombres típicos	Criterios de clasificación para suelos granulares
Suelos de grano grueso (más del 50% del material es mayor en tamiz No. 200)	Gravas (Más de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz No. 4)	GW	Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino	$C_U = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_C = 1 < D^2_{30}/D_{10} \times D_{60} < 3$
		GP	Gravas pobemente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW
		GM $\frac{d}{n}$	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A ó $I_p < 4$
		GC	Gravas arcillosas, mezclas gravo-arenoso-arcillosas	Límites de Atterberg por encima de la línea A ó $I_p > 7$
	Arenas (Más del 50% de la fracción gruesa es menor que el tamiz No. 4)	SW	Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	$C_U = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_C = 1 < D^2_{30}/D_{10} \times D_{60} < 3$
		SP	Arenas pobemente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para SW
		SM $\frac{d}{n}$	Arenas limosas, mezclas arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A ó $I_p < 4$.
		SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla	Límites de Atterberg por encima de la línea A ó $I_p > 7$
Suelos de grano fino (más del 50% del material pasa el tamiz No. 200)	Limos y arcillas (límite líquido $U_L < 50$)	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad.	<ol style="list-style-type: none"> Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. Dependiendo del porcentaje de fino (fracción menor que el tamiz No. 200) los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% — GW, GP, SW, SP Más del 12% — GM, GC, SM, SC de 5 a 12% — Casos de frontera que requieren doble símbolo
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas grasas.	
		OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
		MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos	
	Limo y arcillas (límite líquido > 50)	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas	
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos	
	Suelos altamente orgánicos	Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos	

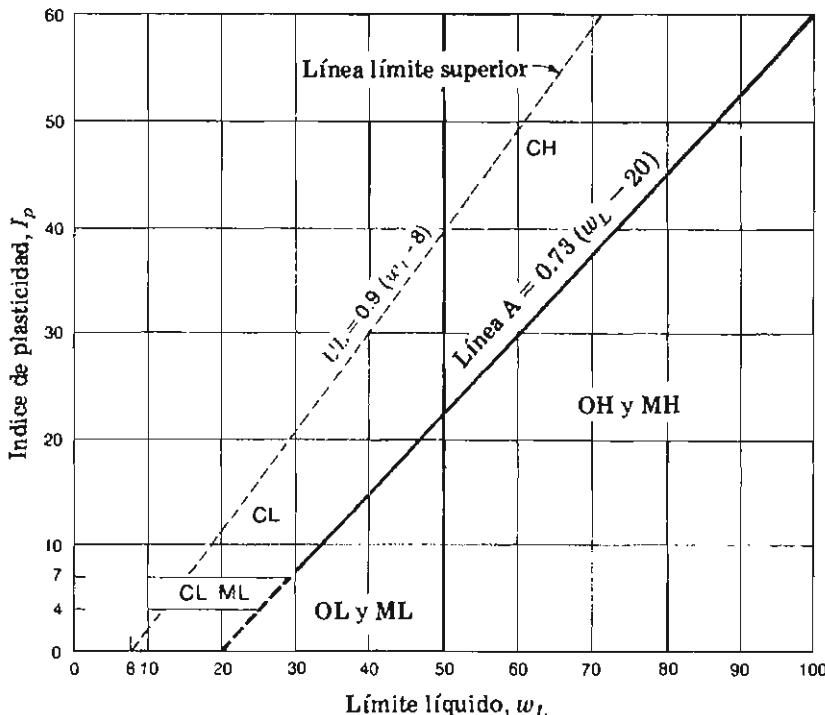


Figura 8-2
Gráfico de plasticidad utilizado con la Tabla 8-1 para la Clasificación Unificada de Suelos.

si más del 12 % del material pasa a través del tamiz No. 200; M = limo; C = arcilla. La designación limo o arcilla se determina después de obtener los valores de los límites líquido y plástico de la fracción menor al tamiz No. 40, y utilizando los criterios de la carta de plasticidad de la Fig. 8-2. Este cuadro es otra contribución de Casagrande al sistema, y la línea A que se encuentra en él, es conocida como la *línea A de Casagrande*. El cuadro que se presenta en este manual ha sido modificado de acuerdo con las sugerencias del Cuerpo de Ingenieros en el sentido de que (hasta el momento) no se han encontrado suelos con coordenadas superiores a las determinadas por la línea "límite superior" mostrada.

3. Las gravas y las arenas se pueden clasificar:

GW-GC	SW-SC	GP-GC	SP-SC
GW-GM	SW-SM	GP-GM	SP-SM

si entre 5 y 12 % del material pasa a través del tamiz No. 200.

4. Los suelos de grano fino (más del 50% pasa el tamiz No. 200) son:

ML, OL, ó CL

si los límites líquidos son menores que 50%; M = limo; O = suelos orgánicos; C = arcilla.

5. Los suelos de grano fino son:

MH, OH, ó CH

si los límites líquidos son superiores a 50%; H = mayor que 50%.

Los límites líquido y plástico se ejecutan sobre material correspondiente a la fracción menor del tamiz No. 40 de todos los suelos, incluyendo gravas, arenas, y suelos finos, utilizando en la ejecución los procedimientos del Experimento No. 3. Estos límites se utilizan con la carta de plasticidad (cuadro A de Casagrande) para determinar el prefijo M, O, ó C, dependiendo de la localización de las coordenadas de plasticidad del suelo dentro de la carta.

Una descripción visual del suelo debe siempre incluirse conjuntamente con el símbolo unificado para completar la clasificación igual que en el sistema AASHTO.

Como ejercicio se reclasifican a continuación los tres suelos clasificados previamente en el sistema de clasificación AASHTO.

Para clasificar el suelo A:

- Se tiene $21.9 < 50$ por ciento que pasa a través del tamiz No. 200 y más del 50% del material que pasa a través del tamiz No. 4 (ya que 68.5% del material pasa el tamiz No. 10), por lo tanto el suelo es bien

SM ó SC

- Con base en $w_L = 34.1$, $I_p = 17.66$ ($w_p = 16.5$) se obtiene que dichas coordenadas sitúan al suelo en la carta de plasticidad (Fig. 8-2) como un CL. Si se acepta C por "arcilla" el suelo debe describirse como:

Arcilla limosa y arenosa, parda clara, SC

Para clasificar B:

- Como el 54.3% pasa el tamiz No. 200, el suelo inmediatamente se clasifica como suelo de grano fino y debe ser un MH, OH, o CH ya que $w_L = 53.5 < 50\%$.
- Del gráfico de plasticidad a $w_L = 5.35$ e $I_p = 21.9$ se obtiene que las coordenadas son difíciles de leer, de manera que se calcula $I_p = 0.73$ ($w_L - 20$) para obtener:

$$I_p = 0.73(53.5 - 20) = 24.4 > 21.9$$

por consiguiente, el suelo es un MH según la localización de sus coordenadas en el cuadro y se clasifica como:

Limo arcilloso con trazas de grava; pardo oscuro; MH (nótese que la descripción visual ha sido cambiada ligeramente para ajustarse al hecho de que el suelo limoso-M-).

Para clasificar el suelo C:

- Con 5.1% del material que pasa a través del tamiz No. 200 el suelo puede ser GW, GP, SW, o SP (usar 5% como suficiente aproximación es estrictamente cuestión de criterio).
- Será necesario hacer una curva de granulometría para obtener:

$$D_{60} = 2.00 \text{ mm}$$

$$D_{30} = 0.29 \text{ mm}$$

$D_{10} = 0.086 \text{ mm}$ (el lector puede verificar estos valores dentro de la precisión posible en una gráfica)

y calcular:

$$C_U = 2.00/0.06 = 23.3 > 6$$

$$C_C = 0.29^2 / (2.00)(0.86) = 0.5 < 1 \text{ (no se encuentra entre 1 y 3)}$$

Como los criterios de gradación no cumplen la condición para material bien graduado, el suelo es mal graduado (sufijo P).

- Con 94.9% del material retenido en el tamiz No. 200 y 69.3% del material que pasa a través del tamiz No. 4, el porcentaje entre los tamices 4 y 200 es:

$$\begin{array}{rcl} 69.3\% - 5.1 & = & 64.2 \\ \% \text{ retenido en el tamiz No. 4} = 100 - 69.3 & = & 30.7 \\ \% \text{ que pasa el tamiz No. 200} & & \hline \\ \text{Total} & = & 100.0 \% \end{array}$$

Con 64.2 por ciento de arena el suelo se clasifica como:

Arena gruesa muy gravosa, pobemente graduada; parda; SP (nótese nuevamente que la descripción se ha cambiado ligeramente debido a que existe mucha más información disponible).

Procedimiento *Esta es una práctica individual*

1. Cada estudiante deberá clasificar el suelo asignado por el instructor¹ de acuerdo con los sistemas unificado y/o AASHTO.
2. Pensar en la información requerida para el sistema de clasificación particular de forma que la cantidad de ensayos necesarios sea la mínima. Utilizar el sistema de determinación del límite líquido con un solo punto.
3. Asegurarse de obtener muestras razonablemente representativas de los recipientes de suelo de forma que sea posible verificar el trabajo en caso de ser necesario.
4. Utilizar el sistema de lavado a través del tamiz No. 200, pues de otra forma se puede errar la clasificación del suelo. No es extraño que un suelo secado al horno y trabajado con suficiente cuidado dé solamente entre 40 y 45% del material menor que el tamiz No. 200, mientras que al lavarlo, produce bastante más del 50% de material a través del tamiz No. 200.
5. En lugar del informe tradicional presentar este trabajo en un exfoliador con una hoja en la cual se tabulen los resultados sobre los formatos respectivos para estos experimentos, incluyendo todas las hojas de formato adicionales utilizadas para hacer los análisis de granulometría, los límites de Atterberg, etc. Asegurarse de proveer una descripción visual completa para cada suelo, al tiempo con el correspondiente símbolo de clasificación del sistema dado.

¹ El autor normalmente exige a sus estudiantes clasificar seis suelos diferentes durante dos períodos de laboratorio, más el tiempo adicional que cada estudiante pueda requerir para hacer el trabajo de clasificación necesario. Esto se logra disponiendo de 15 a 20 suelos diferentes almacenados en recipientes de 10 a 15 kg. Cada estudiante recibe 5 números correspondientes a dichos recipientes más un suelo particular común para todos. Esto asegura el trabajo individual en la práctica.

Experimento N° 9

RELACIONES HUMEDAD-DENSIDAD (Ensayos de compactación)

Referencias

- AASHTO T99-70 (estándar) y T180-70 (modificado)
ASTM D698-70 y D1557-70.
Burmister, D.M., (1965), Factores Ambientales en la Compactación de Suelos, *ASTM STP No. 377*, pp. 47-66.
Gordon, B. B., W. D. Hammond, y R. K. Miller (1965), Efecto del Contenido de Rocas en las Características de Compactación de Suelos Arcillosos, *ASTM STP No. 377*, pp. 31-46.
Johnson, A. W., y J. R. Sallberg (1962), "Factores que Influyen los Resultados de la Compactación", *Highway Research Board Bulletin No. 319*, 148 páginas.
Lambe, T. W., (1960), Arcilla Compactada: Un Simposio, *Trans., ACE*, Vol. 125 pp. 682-756 (también en *J. Soil Mech. Found. Div. S. M.* 2, Mayo).
Lee, P. Y. y R. J. Suedkamp (1972), Características de las Curvas de Compactación de Forma Irregular, *Highway Research Record N°. 381*, pp. 1-9.
Proctor, R. R., (1933), Principios Fundamentales de Compactación de Suelos, *Eng. News Record*, Agosto 31, Sept. 7, 21 y 28.
Seed, H. B., y C. K. Chan (1959), Características de Estructura y Resistencia de Arcillas Compactadas, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE SM 5*, Octubre, pp. 87-128.
Wilson, S. D., (1950), El Aparato de Compactación Pequeño Duplica Adecuadamente los Resultados de Terreno, *Eng. News - Record*, Nov., 2, pp. 34-36.

Objetivo

Familiarizar al estudiante con los ensayos de compactación en laboratorio y la obtención de la relación densidad-humedad para un esfuerzo de compactación dado sobre un suelo particular.

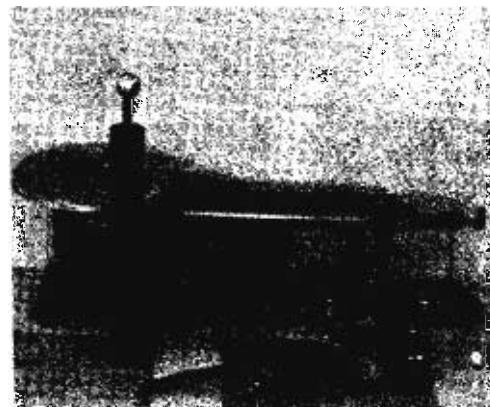


Figura 9-1

Equipo esencial para el ensayo de compactación: balanza grande (20 Kg), Molde de compactación con base y collar, martillo de 24.5 N X 0.35 m de caída, regla de acero para nivelar los extremos de la muestra compactada. No se muestran la bandeja para preparar la muestra (y/o el mezclador mecánico), el martillo opcional de 44.5-N, probeta graduada para el agua ni cuchara para mezclar.

Equipo¹

Molde de compactación² con base y collar (referirse a la Fig. 9-1).

Martillo de compactación (24.5 N X 0.305 m de caída ó 44.5 N X 0.46 m de caída) o martillo operado mecánicamente.

10 a 12 latas para contenido de humedad

Extractor de muestras (gato hidráulico) o pulverizador mecánico como en la Fig. 9-4.

Bandeja mezcladora grande.

Mezcladora para suelos (opcional).

Exposición General

En 1933, R. R. Proctor presentó cuatro artículos en la revista *Engineering New-Record* (Proctor, 1933), los cuales sirvieron de base para los ensayos de compactación usados actualmente (llamados algunas veces ensayos de Proctor o simplemente "Proctor").

El ensayo estándar consiste en tomar 3 kg de suelo, pasarlo a través del tamiz No. 4³, añadir agua, y compactarlos en un molde 944 cm³ en tres capas con 25 golpes por capa de un martillo de compactación de 24.5 N con caída de 0.305 m en el suelo. Esto libera una energía nominal de compactación (en kilo-joules o kJ) al suelo de:

$$CE = \frac{3(25)(24.5)(0.305)}{9.44 \times 10^{-4}(1000)} = 593.7 \text{ kJ/m}^3$$

Luego de compactada de esta manera la muestra es removida del molde y desbaratada nuevamente hasta obtener grumos de tamaño aproximado del tamiz No. 4 *de acuerdo con estimación visual*, se toman muestras para contenido de humedad, se añade más agua, se mezcla cuidadosamente el suelo, y se procede a compactar nuevamente el suelo en el molde⁴. Esta secuencia se repite un número de veces suficiente para obtener datos que permitan dibujar una curva de densidad seca contra contenido de humedad con un punto de pendiente 0 (un valor máximo) y suficientes puntos alrededor de ese máximo para definir adecuadamente su localización. La ordenada de este diagrama es la densidad seca. La ordenada máxima de este diagrama se conoce como *la densidad máxima*, y el contenido de humedad al cual se presenta esta densidad se denomina *contenido de humedad óptimo* (CHO).

Es importante hacer algunos comentarios en este punto:

1. Para que un ensayo sea *estándar*, los resultados deben ser reproducibles, y el hecho de usar muestras frescas cada vez o reutilizar la muestra compactada en el siguiente punto,

¹ El instructor debería hallar el contenido de humedad del suelo para este experimento antes de la práctica —también los valores w_L y w_P de experimentos anteriores— de forma que el CHO puede ser estimado utilizando la Fig. 9-2.

² El molde utilizado en el sistema SI con dimensiones de 10.3 de diámetro X 12.0 cm de altura y volumen de 1000 cm³, puede hacerse a partir de tubería de acero inoxidable que se consigue fácilmente en el comercio (para evitar la corrosión) utilizando tubería de hierro de 4" de diámetro. Maquinar el diámetro interno hasta 10.3 y soldar dos orejas a manera de amarraderas cortadas de un perfil de acero inoxidable de 1 X 1". Maquinar el diámetro externo hasta que ajuste en el collar del molde estándar y utilizar la base para el molde de 1/30 ft³. Rebajar el diámetro interno del collar para que ajuste con el diámetro del molde.

³ Tanto la AASHTO como la ASTM poseen normas de procedimiento para suelos con partículas mayores que el tamiz No. 4.

⁴ Parece que, al momento de hacer la presente revisión (1977), la ASTM está en proceso de modificar el procedimiento con el fin de utilizar suelo fresco en cada punto del ensayo; de forma que se requieran aproximadamente 15 kg de suelo para 5 puntos. Es dudoso que este método gane popularidad (o produzca ventajas sobre el método actual de reutilizar el suelo) debido a la gran cantidad de información exitosa que ha producido dicho método. Siempre fue posible usar suelo fresco para cada punto, sin embargo, muy raras veces se ha hecho, principalmente por la gran cantidad de suelo requerido.

produce diferencias grandes en los valores máximos de densidad seca—no es extraño obtener de esta manera diferencias de 0.8 a 1.2 kN/m³.¹

2. Cuando se trabaja con suelos secados al aire, a menos que la primera muestra se mezcle con el primer incremento de contenido de humedad y se le permita un curado (toda la noche por ejemplo), los resultados pueden traducirse en unos puntos erráticos (en lugar de una curva continua) en la parte seca de la curva. La falta de curado también puede desplazar el CHO a la derecha (tiende a aumentarlo) de la curva densidad seca contra humedad. Algunos suelos pueden dar una curva “errática” en la parte seca como una característica del suelo (ver Lee y Suedkamp, 1972).
3. Si el cilindro de suelos no es compactado en tres incrementos aproximadamente iguales, los puntos de la curva también se mostrarán erráticos, es decir, no caerán en una curva continua a cada lado del óptimo.
4. Para evitar tener que compactar un gran número de cilindros y teniendo en cuenta que 5 puntos bien espaciados determinan muy bien la curva, es deseable comenzar el ensayo a un contenido de humedad entre 4 y 5% cercano al CHO. Añadiendo entonces 2% de humedad (por peso) en cada ensayo sucesivo, el último punto se encontrará 4 a 5% de humedad dentro del lado húmedo del pico de la curva. Para ayudar en la determinación de la humedad del punto de comienzo, se presenta la Fig. 9-2. Esta carta permite estimar el CHO dentro de un $\pm 2\%$ de confiabilidad si existe razonable exactitud en la determinación de los valores de los límites líquido y plástico.

Con la práctica, es posible estimar el CHO añadiendo agua a una porción de suelo en la mano hasta que el suelo se deforme dejando la huella de los dedos cada vez que se le aplique un esfuerzo de amasamiento promedio y que el suelo moldeado de esta forma se resista a la ruptura en pedazos. Si se seca esta muestra para obtener su contenido de humedad se tendrá un buen estimativo del CHO.

5. El molde de compactación debe colocarse sobre una superficie que no vibre durante el proceso de compactación de manera que la energía de compactación no se pierda en producir desplazamientos de la base. La ASTM recomienda hacer descansar el molde sobre una base consistente de un cilindro o bloque rígido de concreto con una masa de por lo menos 90 kg (200 lb.).

El procedimiento original de Proctor se ha modificado algo utilizando un martillo de caída controlada como “25 golpes de un martillo en caída libre desde una altura de 0.305 m”; originalmente Proctor estableció “... 25 golpes firmes de 12” de desplazamiento”. La forma común de presentar los datos consiste en hacer una curva de humedad seca contra contenido de humedad (abscisa). Los datos originales se presentaron en forma de relación de vacíos contra contenido de humedad.

La compactación de suelos en general es el método más barato de estabilización disponible. La estabilización de suelos consiste en el mejoramiento de las propiedades físicas indeseables del suelo para obtener una estructura, resistencia al corte, y relación de vacíos, deseables. Existen muchos métodos para estabilizar suelos utilizando materia química como cal, mezclas de cal y cenizas, cemento, y compuestos de ácido fosfórico, pero estos métodos usualmente son más costosos y pueden utilizar métodos de compactación adicionalmente a las mezclas, pues al incorporar el material químico en la masa de suelo se produce una gran perturbación de su estructura.

¹ Investigaciones hechas por el autor indican que estas diferencias pueden reducirse a un orden de tal vez 0.2 a 0.4 kN/m³ con mezcla mecánica adicional por espacio de 8 a 10 min. En suelos de baja plasticidad las diferencias son negligibles (en la mayoría de los casos). En suelos curados (mezclados con agua por espacio de 10—12 horas antes del ensayo), dichas diferencias son menores.

La compactación produce estabilización del suelo mediante la introducción de energía en el suelo de la siguiente forma:

SIMULADO

Método	En laboratorio	En el terreno
Impacto	Práctica-patrón de compactación	Nada comparable
Acción de amasamiento	Aparato miniatura de Harvard, método Hveem	Rodillo tipo pata de cabra, rueda balanceante
Vibración	Mesa vibratoria, ver Experimento No. 18	Rodillos vibratorios y compactadores
Compresión estática (o dinámica)	Máquinas de compresión	Rodillos de rueda lisa

Generalmente el esfuerzo de compactación imparte al suelo:

1. Un incremento en la resistencia al corte pues ella es función de la densidad (las otras variables son estructura, ϕ y c).
2. Un incremento en el potencial de expansión.
3. Un incremento en la densidad [$\gamma = f(e)$].
4. Una disminución de la contracción
5. Una disminución en la permeabilidad [$k = f(e)$]
6. Una disminución en la compresibilidad [$S = f(e)$]

De esta lista de propiedades afectadas por la compactación, se ve claramente que el problema de especificar la compactación es algo más que simplemente el requerimiento de incrementar la densidad del suelo. También es importante considerar los efectos colaterales; afortunadamente el problema no es tan grave como parecería a primera vista, debido al método de estipular o especificar compactación utilizado más comúnmente $-X\%$ de patrón de compactación, o compactación modificada según el método AASHTO. Es, sin embargo, muy importante especificar el tipo de suelo al cual se aplican los criterios de compactación en un proyecto dado con el fin de eliminar por ejemplo, problemas con el cambio de volumen.

Se reconoce hoy en día que la estructura resultante de la masa de suelos (especialmente cuando hay suelos finos presentes) se asocia íntimamente con el proceso de compactación y el contenido de humedad a la cual se compactó la masa de suelo. Este concepto es importante en extremo para compactar los núcleos de arcilla de represas (por ejemplo), donde asentamientos fuertes podrían causar fracturas de dicho núcleo. Se ha encontrado que la estructura *dispersa* del suelo obtenida al compactarlo en el lado húmedo del óptimo de humedad resulta en un suelo que tiene una resistencia al corte algo menor pero que puede resistir grandes deformaciones sin falla (fracturas) y las consiguientes filtraciones y/o falla total de la presa. La compactación del suelo en el lado húmedo de su óptimo, reduce igualmente su permeabilidad, comparada con la permeabilidad obtenida al compactar en el lado seco del óptimo.

Inversamente, la estructura *floculada* que resulta de compactar el suelo en el lado seco de su óptimo es menos susceptible a la contracción pero más susceptible a la expansión. La resistencia última de los suelos con estructuras floculadas es mayor a bajas deformaciones que la resistencia de los suelos con estructuras dispersas, es decir, el suelo tiende a la falla *frágil*. La resistencia residual del suelo compactado en el lado seco del óptimo es casi la misma resistencia última del suelo compactado en el lado húmedo del óptimo. Por consiguiente, para trabajo de carreteras donde se desean bajar el pavimento deformaciones unitarias muy pequeñas el suelo debería compactarse entre contenidos de humedad en la parte seca hasta el óptimo. El suelo que rodea el núcleo arcilloso de una presa debería también compactarse para producir en él una estructura floculada pues en ese suelo la resistencia

es más importante que la permeabilidad. El núcleo de arcilla por otra parte debe compactarse para producir en él una estructura dispersa ya que es posible que se presenten grandes asentamientos y el suelo debe ser capaz de tolerarlos sin desarrollar fracturas o fisuras que permitan una falla por sifonamiento/filtración.

Del anterior breve razonamiento es evidente que los criterios de compactación deberían basarse en consideraciones sobre la estructura del suelo, resistencia, permeabilidad, etc., como propiedades de diseño requeridas más que la simple obtención de una curva de compactación en el laboratorio y el requerimiento de que el suelo se compacte a un determinado porcentaje de compactación relativa; sin embargo, en muchos casos —especialmente cuando la densidad (y el control de asentamiento) es la única propiedad que se necesita— con esto se obtiene un producto satisfactorio (como ha sido la normal en el pasado).

Compactación relativa es el término utilizado para comparar el suelo compactado *in situ* con la curva de compactación de laboratorio. La compactación relativa se define como:

$$\text{Compactación relativa} = \frac{\text{densidad del suelo compactado en el campo}}{\text{densidad máxima del laboratorio}} \times 100\% \quad (9-1)$$

y puede ser mayor o menor que 100%. Por ejemplo, un proyecto particular puede especificar que el suelo alcance el 90% de compactación relativa; otra práctica puede especificar un 105% de compactación relativa. Si la densidad seca máxima es 18.50 kN/m³, el peso unitario de campo es:

A 90% de compactación relativa 18.50 (0.90) = 16.65 kN/m³

A 105% de compactación relativa 18.50 (1.05) = 19.42 kN/m³

De la tabla de métodos de compactación dada anteriormente se puede ver que no existe contraparte en métodos de compactación a los métodos de impacto de laboratorio. La reutilización del suelo para desarrollar la curva de compactación es un proceso preferentemente de laboratorio, que produce en el suelo un procesamiento considerablemente mayor que el que tiene lugar en el campo. Se ha obtenido una gran cantidad de información que indica que la estructura del suelo, la densidad y el C.H.O dependen del método de proveer la energía de compactación (amasamiento, impacto, vibración, etc.). A pesar de este defecto el ensayo patrón de compactación tal como se ha delineado aquí es ampliamente utilizado para establecer los criterios de compactación. Existe una gran cantidad de información que indica que este método funciona; además desde el momento cuando el ensayo fue propuesto, nadie ha desarrollado un método mejor de forma que no existe una razón válida en el presente momento para descartar ese procedimiento.

Un poco antes y durante la Segunda Guerra Mundial, los pesados equipos de aviación militar comenzaron a exigir densidades de subrasante bajo las aeropistas, mayores que las que podían proporcionar los métodos tradicionales de compactación. En lugar de incrementar las compactaciones relativas por encima del 100%, se introdujo un ensayo de compactación modificado (ahora llamado *Proctor Modificado*, *ensayo modificado AASHTO*, o *ensayo de compactación modificado*). Este ensayo tiene las siguientes características:

Molde	944 cm ³
Martillo	44.5 N
Capas	5 a 25 golpes por capa
Caida del martillo	0.46 m

Las características básicas del Experimento son las mismas del ensayo patrón de compactación, esto es, usar la fracción menor del tamiz No. 4, o consultar las normas ASTM o AASHTO para casos en los cuales haya presentes gravas mayores, desarrollar la curva tal como la del experimento patrón: añadir incremento de agua al suelo, compactar, desbaratar la muestra, tomar un contenido de humedad, y repetir el proceso hasta obtener todos los puntos de la curva.

El ensayo de compactación modificado introduce una energía nominal de compactación al suelo de 2710 kJ/m³ (el lector debería verificar esto) o cerca de cinco veces la

energía de compactación del Experimento patrón. Para esta energía mayor se obtiene un incremento entre el 5 y el 10% en densidad y un valor reducido del CHO sobre los datos correspondientes en el Experimento patrón. Los datos para el ensayo de compactación modificado también se representan en curvas de densidad seca contra contenido de humedad.

La gráfica de densidad seca contra contenido de humedad indica que el proceso de compactación a *cualquier esfuerzo de compactación* se vuelve cada vez más eficiente hasta un cierto valor del contenido de humedad (CHO), a partir del cual su eficiencia decrece. La eficiencia crece a medida que se le añade agua, inicialmente debido a la saturación y/o ruptura general de las uniones interparticulares de los grumos de arcilla y posiblemente a alguna lubricación. En la parte húmeda de la curva los terrones generalmente se han extinguido y el exceso de humedad produce presiones instantáneas de poros sumamente altas a medida que el martillo produce su impacto. Estas altas presiones de poros producen una reducción apreciable en la resistencia al corte del suelo y el martillo por consiguiente produce simplemente un corte (remoldeo) del suelo más que un incremento adicional en la densidad.

La masa de suelo involucrada en el proceso de compactación comienza como un sistema de tres fases: suelo, agua y aire. Durante los primeros ensayos hay una cantidad considerable de aire presente, pero el proceso produce un cambio de estado en el cual cada vez hay más suelo y agua presentes. Aún en la situación de CHO existe una cantidad de aire considerable. En la parte húmeda de la curva, el efecto principal es el de desplazar más y más aire por agua. Si el proceso fuera completamente eficiente, sería posible reemplazar todo el aire de los vacíos con agua para producir un sistema de dos fases (una condición de *cero-aire-vacíos*). Como nunca es posible sacar todo el aire de los vacíos, lo cual resultaría en una condición de $S = 100\%$, cualquier curva de compactación *estará siempre por debajo de la curva -aire-vacíos*.

Para cualquier contenido de humedad w dado el peso unitario cero-aire-vacíos se calcula como:

$$\gamma_{zare} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + w G_s} \quad (9-2)$$

El lugar geométrico de los puntos determinados por esta ecuación produce una curva ligeramente cóncava hacia arriba.

Un gran número de factores entre los cuales se destacan los siguientes, influyen sobre la compactación del suelo:

Temperatura

Tamaño del molde (al mantener la relación diámetro/altura aproximadamente constante el efecto se hace despreciable).

Distribución de golpes en cualquier capa.

Exceso de cantidad de suelo en el molde.

Tipo de suelo (nótese que sólo los suelos cohesivos pueden compactarse utilizando métodos de impacto).

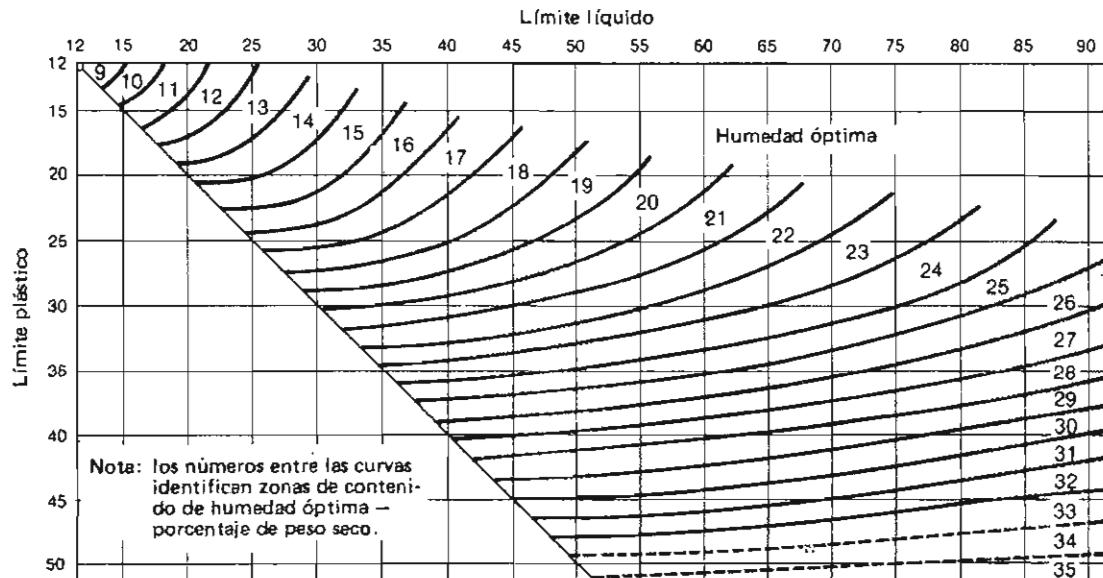
Cantidad de procesamiento (mezclado, curado, manipulación).

El lector debería utilizar la lista de referencias para estudiar factores adicionales que pueden influir en los resultados de la compactación.

Procedimiento *Esta es una práctica de grupo*

Nota: Debe tomarse una muestra para contenido de humedad 24 horas antes del ensayo de forma que sea posible conocer razonablemente el contenido de humedad inicial; de otra forma, serían necesarios 6 u 8 Experimentos para obtener la curva de compactación — especialmente para aquellos suelos cuyo CHO se encuentra entre 17 y 22%.

1. Cada grupo debe tomar 3 kg (peso nominal) de suelo secado al aire, pulverizarlo suficientemente para que pase a través del tamiz No. 4; a continuación mezclarlo con la cantidad de



EJEMPLO: Dados: Límite líquido = 35 Encontrar: humedad óptima promedio
 Límite plástico = 20 Respuesta: 16%

Figura 9-2

Gráfico para encontrar el contenido de humedad óptima (CHO) de un suelo para usar en el ensayo de compactación estándar. (Este gráfico se ha reproducido con permiso de Johnson y Sallberg (1962), p. 125).

agua necesaria para hacer el incremento de humedad basado en porcentaje de peso seco. El porcentaje inicial de incremento de agua debería tener en cuenta el contenido de humedad 4 a 5% por debajo del CHO, y obtener el CHO bien de la Fig. 9-2 o por cualquier otro medio de estimación.

- El suelo y el agua deberían mezclarse con anterioridad y curarse por espacio de 24 horas antes del ensayo, pero en los laboratorios para estudiantes esto puede omitirse.
2. Si el suelo se ha "curado", añadir 1% de humedad por peso [$0.01 \times 3 = 0.03 \text{ kg (30 ml)}$], para tener en cuenta las pérdidas por evaporación. Mezclar esta agua al suelo cuidadosamente.
 3. Pesar el molde de compactación, sin incluir la base ni el collar.
 4. Medir el molde de compactación para determinar su volumen (o a discreción del instructor suponer que el volumen es 944 cm^3 (o 1000 cm^3 como encuentre más apropiado)).
 5. Usar bien el método patrón de compactación o bien el modificado como se especifique por parte del instructor y compactar un cilindro de suelo. Si se utiliza el cilindro de 1000 cm^3 utilizar 26 golpes/capa, en lugar de 25, para producir la misma energía de compactación en cada ensayo.
 6. Enrasar cuidadosamente *la base* y la parte superior del cilindro compactado al suelo con una regla metálica. Llenar cuidadosamente con suelo o gravas pequeñas cualquier agujero que pudiera haber quedado en la superficie o haberse hecho por remoción de alguna grava en el proceso de emparejamiento de la superficie.

Nota: Si el molde no se llena por encima de la junta del collar durante la compactación de la última capa, no añada suelo para suplir la deficiencia, repita el ensayo. Es posible evitar esta situación chocante, si se nota que el suelo puede terminar por debajo del collar, añadiendo algo más de material hasta sobrepasar la junta, luego terminar los golpes faltantes. En el otro extremo debería tratarse de evitar tener más de 6 mm de suelo sobre el nivel de la junta (ver Fig. 9-3). Si queda un exceso muy grande de material por encima de la junta del collar, es posible que al remover el collar se remueva la última capa de suelo compactada. Si pasa esto, es necesario volver a reemplazar apropiadamente dicha capa. Si el collar es difícil de remover, no es aconsejable girarlo pues se puede dañar la última capa de suelo. Tomar una espátula y remover suelo sobre los bordes del collar hasta que se afloje y se pueda remover fácilmente. Recordar que se tiene un error multipli-

cador de 1060 en este proyecto; por consiguiente un error de 15 gm de suelo produce un error de compactación cercano a 0.15 kN/m^3 — y 15 g de suelo no es una cantidad muy grande.

7. Pesar el molde lleno de suelo húmedo.
8. Extraer el cilindro de suelo del molde, partirlo en dos, y tomar dos muestras para contenido de humedad —una cercana a la parte superior del molde, y otra a la parte inferior— dejando en el recipiente de humedad tanto material como sea posible (alrededor de 100 g). A manera de alternativa, se puede usar un reductor de muestra¹ (Fig. 9-4) para remover el suelo y pulverizarlo directamente desde el molde. Se debe tomar igualmente dos muestras para contenido de humedad de la parte superior e inferior de la muestra de suelo a medida que se saca el suelo del molde.

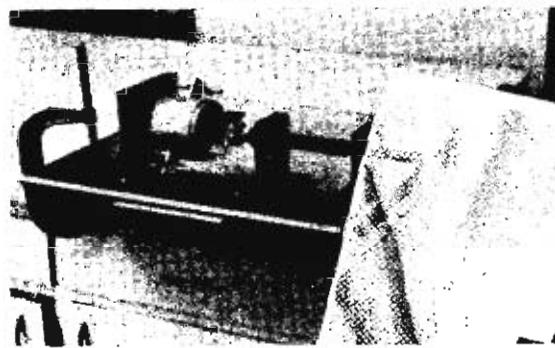
Figura 9-3

Espécimen compactado, luego de removido el collar e iniciado el proceso de nivelación o enrascado. Nótese que el suelo sobresale unos 6 mm por encima del molde.



Figura 9-4

Aparato para pulverización de muestras de compactación desarrollado por el autor. (a) El pulverizador con la muestra montada para ser barrenada con el aparato.



(b) Pulverización de una muestra compactada. Nótese que el suelo se reduce aproximadamente al tamaño del tamiz No. 4 (por inspección visual).



¹Este aparato se desarrolló y patentó por el autor y ha sido usado exitosamente por varios años con un considerable ahorro de tiempo (a menudo de dos a tres horas por ensayo).

ENSAYO DE COMPACTACION

Formato 10

Proyecto EXPERIMENTO PATRON DE COMPACTACION Trabajo No. ~Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~Descripción del Suelo ARCILLA ARENOSA Y LIMOSA Parda CLARA A2-6(3); $W_L = 28.3, W_p = 14.1$ Realizado por J. E. B. Y M. C. Fecha de la práctica 10-8-76Golpe/capa 26.3 No. de capas 3 Peso del martillo 24.5Dimensiones del molde: 10.3 cm Alt. 12.0 cm Vol. 1000 cc*Determinación del contenido de humedad*

Muestra No.	1	2	3	4	5	6
Lata de humedad No.	75	77	81	86	87	88
Peso de lata + suelo húmedo	93.80	98.24	93.96	101.76	97.62	88.47
Peso de lata + suelo seco	88.64	92.66	87.37	94.46	89.00	80.94
Peso del agua	5.16	5.58	6.59	7.30	8.62	7.53
Peso de la lata	22.57	22.02	22.00	22.32	17.85	17.80
Peso del suelo seco	66.07	70.64	63.37	72.14	71.15	63.14
Contenido de humedad, w	7.81	7.90	10.08	10.12	12.11	11.93
	14.31	14.39	14.39	16.51	16.64	

Determinación de la densidad

Contenido de humedad deseado	8	10	12	14	16
Contenido de humedad, w_m	7.8	10.1	12.0	14.4	16.6
Peso de suelo + molde	3757.2	3921.4	4109.0	4082.5	4015.2
Peso del molde	1933.0				
Peso de suelo seco en molde, g	1824.2	1988.4	2176.0	2149.5	2082.2
Densidad húmeda, kN/m^3	17.89	19.50	21.34	21.08	20.42
Densidad seca, γ_{seca} , kN/m^3	16.60	17.71	19.05	18.43	17.51

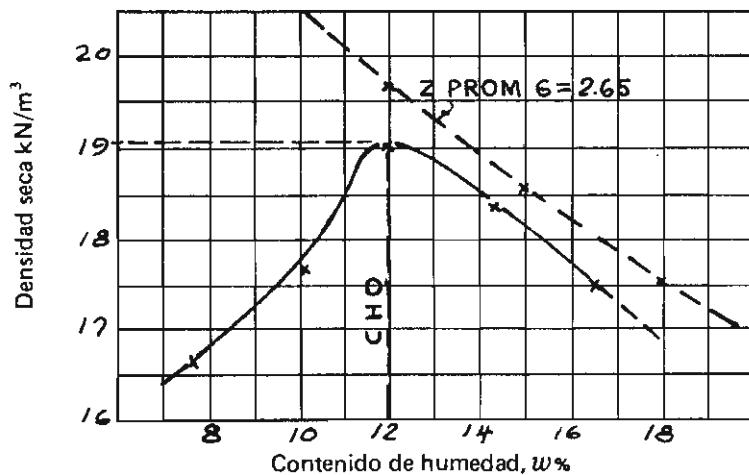
Contenido de Humedad Optimo = 12.0 % Densidad Seca Máxima = 19.05 kN/m^3

Figura 9-5

Datos de un ensayo de compactación que incluyen la información de peso unitario seco vs. contenido de humedad para obtener el peso unitario seco máximo y el CHO.

Cuando se utiliza un extractor de muestras (gato hidráulico) es necesario tener en cuenta que algunos moldes se amplían ligeramente de forma que la base es un poquito mayor que la parte superior de la muestra. Si éste es el caso, la muestra debe extraerse más fácilmente si el extremo más ancho sale primero del molde¹.

9. Despedazar la muestra hasta tamaño aproximado del tamiz No. 4 (a menos que el reductor de muestra se haya utilizado) y añadir 2% (basado en el peso original de la muestra de 3 kg) de agua. Mezclar nuevamente con cuidado y repetir los pasos 5 a 9 hasta que, sobre la base del peso húmedo, se obtengan 2 valores de peso de material compactado ligeramente menores que un determinado valor pico.
10. Volver al laboratorio al día siguiente y pesar las muestras de contenido de humedad secadas al horno para encontrar el promedio real de contenido de humedad de cada ensayo.
11. Calcular el peso unitario seco y hacer una gráfica de γ_{seco} contra contenido de humedad, con γ_{seco} como ordenada (ver Fig. 9-5). En esta curva dibujar la curva cero-aire-vacíos. Si G_s no se conoce, suponer que la densidad cero-aire-vacíos en el contenido de humedad óptimo es 5% mayor que la máxima densidad seca. De esa suposición se puede calcular el valor de G_s para el suelo y encontrar la densidad seca a otros valores de contenido de humedad para dibujar la curva de cero-aire-vacíos. Si la curva cae debajo de la curva de compactación en cualquier punto el porcentaje de 5% supuesto fue incorrecto, de manera que se puede hacer incrementos adicionales de 1% de densidad y recalcular hasta que se obtenga una curva cero-aire-vacíos que caiga en todos sus puntos por encima de la curva de compactación. Asegurarse de utilizar una buena escala para la curva de compactación ya que este gráfico se utiliza para propósitos cuantitativos.
12. Mostrar el límite líquido, el límite plástico, G_s y la clasificación AASHTO de este suelo en los formatos de datos al lado de la curva de compactación. Si se utilizan diferentes suelos para el ensayo de los que se utilizaron para los Experimentos Nos. 3, 5 y 7, deberían hacerse estos ensayos como parte de esta práctica.
13. En su memoria de cálculos, deducir la ecuación 9.2 para cero-aire-vacíos.
14. (*Opcional*) Sobre la base del valor de la gravedad específica, G_s , y del valor del ensayo obtenido en el paso 11, calcular la relación de vacíos del suelo para cada punto del ensayo. Sobre una gráfica de papel milimetrado, volver a dibujar la curva de compactación, además, utilizando como ordenada la relación de vacíos (a la derecha del papel) dibujar la curva de e contra contenido de humedad (usar la misma escala de contenido de humedad para ambas) y comentar sobre cuál método presenta mejor los datos del ensayo. Este método, e contra contenido de humedad, fue el usado originalmente por Proctor.
15. (*Opcional*) Establecer lo que se recomendaría como compactación relativa y contenido de humedad de compactación para utilizar este suelo en la construcción de un terraplén de 10 m de altura para una carretera.

¹ Si se utiliza muestra fresca de suelo para cada punto, es posible descartar el material sobrante de la muestra compactada y repetir los pasos 5 a 8.

Experimento N° 10

DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE SUELO EN EL TERRENO

Referencias

AASHTO T181-62 (Método para Agregados Gruesos de Gran Tamaño)

T191-61 (Método del Cono de Arena)

T205-64 (Densidad por Medio de la Bomba o Balón)

ASTM D1556-64 (Cono de Arena) y D2167-66 (Método del Balón de Caucho)

Objetivo

Presentar al estudiante dos métodos comúnmente utilizados para determinar la densidad del suelo en el terreno.

Equipo

Aparato de cono de arena (ver Fig. 10-1)

Aparato de densidad con balón

Herramientas para excavar

Latas con tapa hermética [4000 ml (1 galón)]¹

Una talega para cada grupo para recuperar la arena del ensayo de densidad.

Exposición General

Una vez establecidos, para el suelo que se va a utilizar en un sitio determinado, los criterios de compactación, generalmente con limitaciones de humedad y densidad, es necesario utilizar algún método para verificar los resultados. En todos los proyectos pequeños y casi todos los proyectos grandes, esta verificación se logra bien por el cono de arena o por el método del balón de densidad (ver Fig. 10-2). En unos pocos proyectos muy grandes, se ha utilizado y se sigue utilizando equipos nucleares recientemente desarrollados. El método nuclear sobrepasa los objetivos de este manual y por esto no será considerado.

Básicamente, tanto el método del cono de arena como el método del balón de densidad utilizan los mismos principios. O sea, se obtiene el peso de suelo húmedo de una pequeña excavación de forma algo irregular (un hueco) hecho sobre la superficie del suelo. Si es posible determinar el volumen de dicho hueco, la densidad húmeda del suelo se calcula simplemente como:

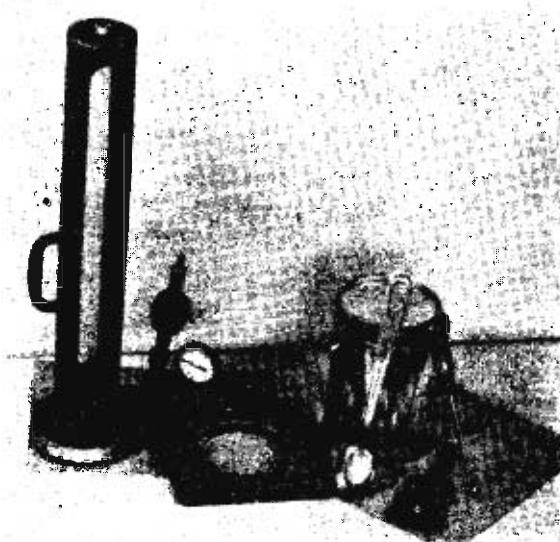
$$\gamma_{\text{Hum}} = \frac{\text{Peso del suelo húmedo}}{\text{Volumen del hueco}} \quad (10-1)$$

¹ El autor ha encontrado que las latas comunes de empaque de café en 3 libras con tapas plásticas sirven este propósito de la mejor forma. Su capacidad es de 3000 ml, y son fáciles de abrir, cerrar y vaciar. Las tapas plásticas permiten un cierre hermético suficiente para impedir la pérdida de humedad durante varios días.



Figura 10-1

Equipo para determinar la densidad en el terreno.
(a) Equipo de cono de arena: cono de arena, frasco plástico, placa para apoyar el cono, brocha para remover el suelo que caiga en la placa, cuchara y destornillador para excavar el hueco, y un envase de café de 3 lbs con su tapa plástica para guardar el suelo removido del hueco.



(b) Equipo de balón para densidad: Aparato para montar el balón equipado con manómetro de presión (opcional), placa para apoyar el aparato, herramientas para excavar el suelo, brocha para recoger el suelo que caiga en la placa, lata con tapa hermética para preservar la muestra de suelo sacada del hueco.

y si se obtiene el contenido de humedad w del material excavado, el peso unitario seco del material es:

$$\gamma_{\text{seca}} = \frac{\gamma_{\text{Hum}}}{1 + w} \quad (10-2)$$

Los métodos de cono de arena y balón permiten encontrar el volumen del hueco en la ec. (10-1). Por el método del balón, dicho volumen se encuentra midiendo directamente el volumen de agua bombeada a un balón de caucho que llena el hueco. Este volumen se lee directamente de un cilindro graduado el cual forma el volumen del recipiente para el balón. Este medio rápido de encontrar el volumen del agujero es a menudo una clara ventaja en términos de tiempo sobre el método del cono de arena, el cual es más indirecto. Debe cuidarse mucho en no dejar el hueco tan irregular en su forma o con proyecciones demasiado agudas que puedan causar la destrucción del balón. Antes de utilizar el aparato debe obtenerse una lectura de cero, a partir de la cual, a menos de que exista evaporación excesiva en el recipiente o se rompa el balón, se pueden tomar muchas medidas de volumen de hueco sin necesidad de repetir la medida de cero.

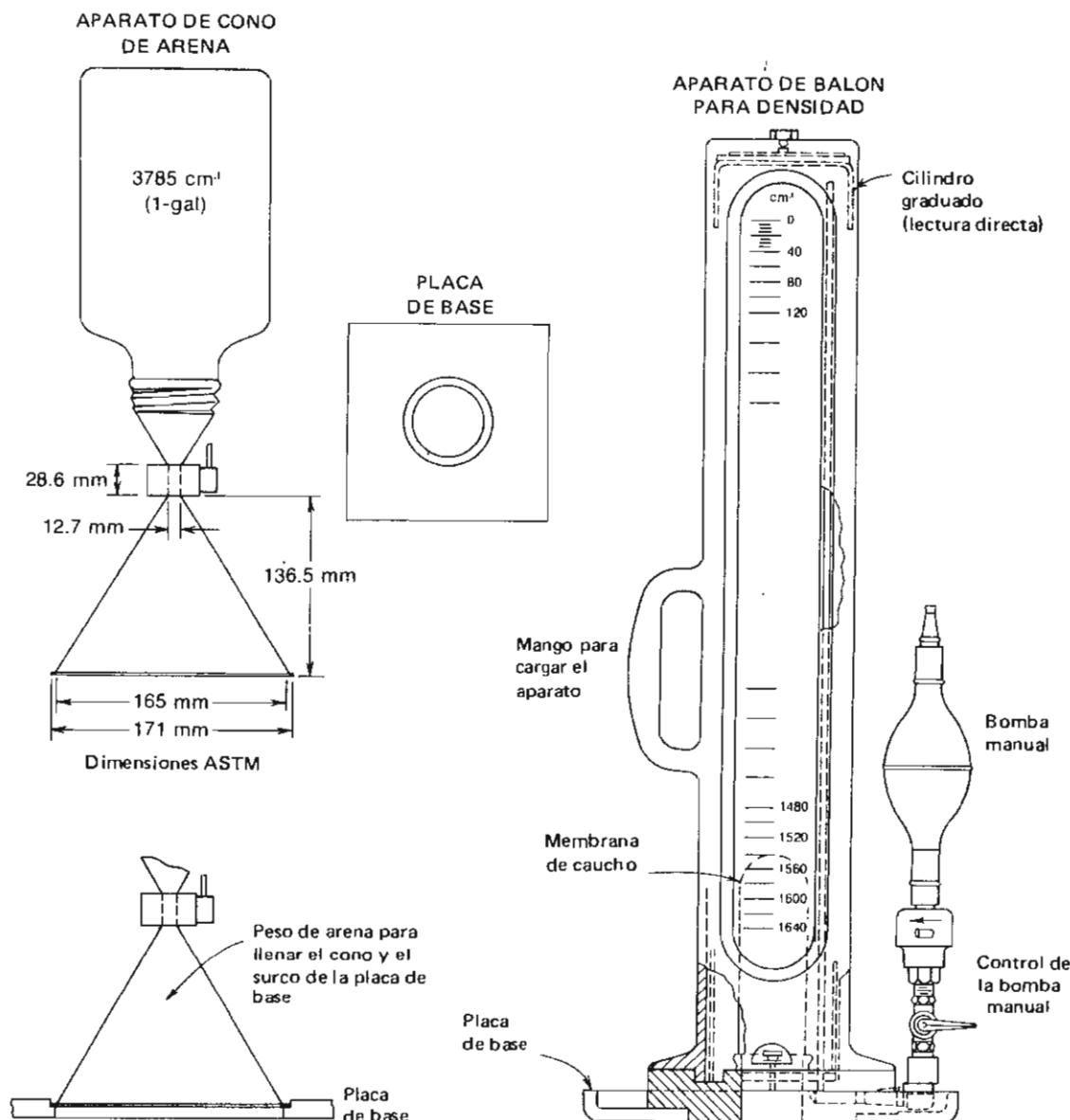


Figura 10-2
Detalles típicos de los aparatos de cono de arena y balón para densidad.

El método del cono de arena representa una forma indirecta de obtener el volumen del agujero. La arena utilizada (a menudo arena de Ottawa) es generalmente material que pasa el tamiz No. 20 y ésta se encuentra retenida por el tamiz No. 30¹. Aunque el material menor que el tamiz No. 30 y mayor que el tamiz No. 40 o el material menor que el tamiz No. 30 y mayor que el tamiz No. 50 puede también utilizarse, generalmente es deseable tener una arena uniforme o “de un solo tamaño” para evitar problemas de segregación (un volumen de arena fina puede pesar más que el mismo volumen de arena gruesa, y un volumen de la mezcla puede pesar aún más), de forma que en las mismas condiciones de vaciado pueda lograrse la misma estructura del suelo (*de la misma densidad*) y duplicación requerida.

¹Nótese que la designación D1556-64 de la ASTM solamente requiere arena en el siguiente rango No. 200 < arena < No. 10.

Si se tiene un material de densidad constante, de por ejemplo 1.60 g/cm^3 y se echan 4800 g de este material en un hueco de forma irregular, el volumen del hueco puede encontrarse por regla de tres¹, así:

$$\frac{V}{4800} = \frac{1 \text{ cm}^3}{1.60 \text{ g/cm}^3}$$

$$\text{ó } V = \frac{4800}{1.60} = 3000 \text{ cm}^3$$

y en general el volumen del hueco es:

$$V_{\text{hueco}} = \frac{\text{Peso del material utilizado para llenar el hueco}}{\text{Peso unitario del material}} \quad (10-3)$$

Varios comentarios deben hacerse en este punto:

1. El aparato de densidad por medio del balón se suministra en dos tamaños:²
1596 cm^3 y 2230 cm^3

El aparato de cono de arena más comúnmente usado utiliza un recipiente de arena plástico o de vidrio de 3785 cm^3 (1 galón) con suficiente material para llenar un hueco (y el respectivo cono) no mayor de 3800 cm^3 , dependiendo de cuán cuidadosamente se haya llenado el recipiente antes de ser usado. Es posible además conseguir recipientes de dos galones (7500 cm^3) y medio galón (1900 cm^3), aunque no son ampliamente utilizados.

En general, los agujeros para ensayos de campo deben ser pequeños, produciendo esto un error multiplicador grande por lo cual es absolutamente esencial impedir la pérdida de suelo durante la excavación, ya que la determinación del volumen hecha en cualquier forma daría un volumen aparente del agujero demasiado grande.

Como una guía, la ASTM sugiere los siguientes criterios para seleccionar volumen de agujero y tamaño de la muestra para contenido de humedad, con el fin de obtener resultados razonables en el ensayo.

Tamaño máximo en el suelo según tamiz	Vol. del hueco para el ensayo (cm^3)	Tamaño de la muestra para contenido de humedad (g)
No. 4	700	100
12.7 mm	1400	250
25.0	2100	500
50.0	2800	1000

Si existe suficiente espacio en el laboratorio, el mejor resultado de contenido de humedad es aquél que se obtiene al secar la totalidad del suelo excavado del agujero en el terreno.

2. La excavación debe hacerse tan rápido como sea posible para mantener el contenido de humedad natural del suelo que está guardándose en la lata con cierre hermético. La lata debe sellarse tan pronto como se termine de hacer la excavación.
3. Cuando se utilice el método del cono de arena es importante evitar cualquier vibración en el área circundante, o en el recipiente donde se encuentra la arena, ya que esto puede introducir exceso de arena en el agujero y por consiguiente incrementar el volumen aparente del agujero.

Procedimiento *Esta es una práctica de grupo y de clase*

1. Cada grupo debe hacer el ensayo de densidad por el cono de arena en el área designada por el instructor.

¹ Es definitivamente una conveniencia de cálculo utilizar g/cm^3 , g y cm^3 en estos cálculos aunque no sean las unidades correctas del sistema SI.

² SOIL Test, Inc., Evanston, Illinois, vende cilindros para medición con valor en calibración métrica para reemplazar los cilindros graduados en sistema fps.

2. Cada grupo de laboratorio debe (como un proyecto conjunto) hacer experimentos en un mismo agujero utilizando el aparato del balón para medir el volumen del agujero.
3. La cantidad total de suelo removida de los agujeros debe meterse al horno para determinar el contenido de humedad del suelo en el terreno.
4. Utilizar los formatos incluidos en el libro de la sección correspondiente de este manual.

A. TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo se hará primero como sigue:

1. Antes de ir al campo: (a) cada grupo debe pesar el recipiente del aparato de cono de arena, lleno de arena para obtener el peso W_j , y las latas de cierre hermético con tapa para obtener el valor W_c . (b) Cada grupo deberá colocar el aparato de densidad por balón *sobre su placa de base* sobre una superficie plana y obtener la lectura de cero. Colocar la lectura de cero en el tablero de forma que se pueda hacer un promedio para la clase.
2. Cada grupo debe proceder al terreno y excavar un agujero utilizando la placa de base provista con el cono de arena (ver Fig. 10-3). Colocar cuidadosamente todo el suelo removido del agujero en una de las latas con cierre hermético. Antes de colocar la placa sobre el sitio, es importante asegurar que la superficie de la zona de excavación sea plana y lisa.
3. A continuación, con la válvula cerrada, voltear boca-abajo el aparato del cono de arena sobre la placa y abrir la válvula. Cuando la arena cese de caer en el agujero, es necesario cerrar la válvula y levantar el conjunto. A continuación es preciso recuperar tanta arena (la arena de Ottawa es relativamente costosa) del hueco y la placa como sea posible, y colocarla en el saco provisto.
4. Un grupo, designado por el instructor, deberá instalar la placa de base del balón en un sitio y excavar en el suelo un agujero similar al que se hizo para el ensayo del cono de arena, aunque de volumen menor.
5. Cada grupo debe a continuación colocar el aparato del balón sobre la placa, bombear el balón dentro del agujero para tomar una medida de volumen y registrar la lectura final en el recipiente de agua. Si el aparato está equipado con un manómetro de presión, es preciso verificar que la presión no sea superior a 0.2 kg/cm^2 (3 psi).
6. Si el trabajo estudiantil se hace en un sitio interno dentro de los predios de la Universidad, es preciso asegurarse de restituir el paisaje de la zona donde se trabajó a sus condiciones iniciales.
7. Con esto se termina el trabajo de campo y es posible entonces regresar al laboratorio. Verificar que no se deje en el campo nada del equipo que se trajo.

B. TRABAJO DE LABORATORIO INMEDIATO

1. Cada grupo debe pesar la lata con suelo húmedo obtenida en el campo y registrar dicho peso en la línea apropiada de su formato. Echar el contenido de la lata en un recipiente pesado y colocarlo dentro del horno para secado.
2. Cada grupo debe pesar su recipiente con cono parcialmente vacío de arena y registrar su peso en la sección apropiada del formato.
3. Colocar las lecturas del volumen del balón en el tablero del laboratorio de suelos, promediar y substraer la lectura promediada de cero para obtener un promedio de volumen del hueco para toda la clase. Registrar en el formato correspondiente tanto el valor promediado para las lecturas final e inicial, como el promedio obtenido para el volumen del hueco V_h .
4. El grupo encargado de tomar la muestra de suelo del hueco que se utilizó para el ensayo del balón debe poner el peso húmedo registrado para dicho suelo en el tablero.

C. TRABAJO POSTERIOR DE LABORATORIO

1. Retornar al laboratorio al día siguiente para pesar las muestras secadas al horno y poder de esa forma encontrar el peso seco del suelo removido de los agujeros. Registrar este dato en el sitio apropiado en los formatos.

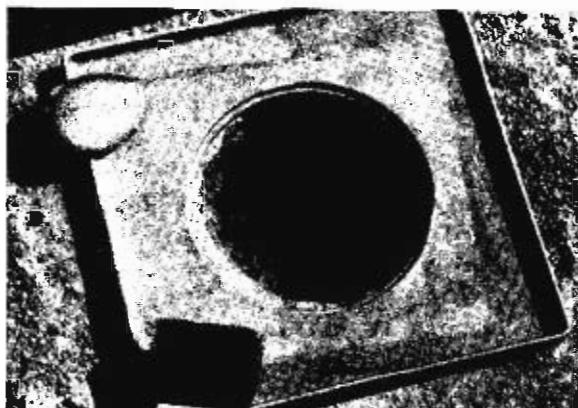
Figura 10-3

Densidad en el terreno utilizando el cono de arena.

(a) Herramientas para excavar el hueco, lata para muestra (envase de café pintado de gris) y brocha de 60 mm para limpiar la base. Nivelar y suavizar la superficie donde se va a colocar la base, como se muestra. Rellenar con suelo original cualquier hueco que se haga por remoción de gravas o pequeñas rocas superficiales.



(b) Excavación del hueco. Se puede utilizar un destornillador para aflojar el suelo y luego removerlo con la cuchara como se muestra. Recuperar y guardar cuidadosamente las piedras más grandes como se puede apreciar en la lata. Si hay partículas de más de 35 a 40 mm, el tamaño de este equipo de muestreo puede ser inadecuado para el sitio.



(c) Hueco completo. El hueco debe limpiarse cuidadosamente de boronas de suelo suelto y debe tener una profundidad entre 100 y 150 mm (y volumen suficiente para llenar entre tres cuartos y nueve décimos de lata).



(d) Colocar cuidadosamente la botella y el cono sobre la base y abrir la válvula. Evitar al máximo las vibraciones cercanas al sitio del ensayo. Nótese que la lata está llena hasta los tres cuartos de su volumen (compactado por sacudimiento). La lata está abierta para el propósito de la fotografía — normalmente debe taparse inmediatamente se completa el muestreo para evitar pérdida de humedad.

2. Cada estudiante deberá calcular el contenido de humedad y los pesos unitarios húmedos y seco respectivamente del agujero del ensayo para el grupo correspondiente a cada persona¹.
3. Registrar en el tablero para el resto del grupo del laboratorio el peso de suelo seco obtenido para el agujero del ensayo del balón.
4. Cada estudiante debe calcular el contenido de humedad y los pesos unitarios húmedo y seco para el suelo del ensayo del balón.

D. CALIBRACION DEL EQUIPO

Cada grupo debe determinar 3 ítems de información:

1. La densidad (g/cm^3) de la arena utilizada en el ensayo de densidad en el terreno.
2. El peso de la arena requerida para llenar el cono y el espacio existente en la placa de base (ver Fig. 10-2).
3. La calibración del aparato de densidad por medio del balón.

El siguiente procedimiento puede utilizarse para determinar la densidad de la arena utilizada en el aparato de cono de arena:

1. Pesar un molde patrón de compactación (944 ó 1000 cm^3) con su base ajustada. Estrictamente el volumen debería también determinarse, pero puede suponerse que tiene el volumen correcto dentro de la aproximación del trabajo de laboratorio. Nótese que cualquier recipiente disponible de volumen conocido y forma razonablemente regular puede utilizarse en lugar del molde de compactación.
2. Echar cuidadosamente dentro del molde arena a la misma altura aproximadamente a la cual la arena cae en el hueco en el terreno. Enrasar con gran cuidado el material en la parte superior con una regla metálica y pesar.
3. Repetir el paso 2 varias veces hasta obtener dos registros con muy buena concordancia (por ejemplo, dentro de los 10 g), promediar los resultados de estas dos medidas y ponerlas sobre el tablero.
4. Obtener el promedio de todos los valores registrados en el tablero por los diferentes grupos, excepto aquellos grupos cuyo valor se encuentre sustancialmente en desacuerdo con los de la mayoría, quienes deberán repetirlo. El *valor promedio* de la densidad debe registrarse en el sitio apropiado en el formato y utilizarlo por todos los grupos para la determinación del volumen del hueco.

Para determinar el peso de arena necesario para llenar el cono y el espacio de la placa de base:

1. Colocar la placa sobre una superficie plana. Pesar el cono de arena con su recipiente adyunto lleno de arena y anotar dicho peso.
2. Voltear boca abajo el cono y la botella con la válvula cerrada y colocarlo sobre la placa. Abrir la válvula y permitir que caiga la arena hasta que se note que ha parado de fluir; a continuación cerrar la válvula.
3. Volver a pesar la arena remanente en el recipiente. La diferencia entre los pesos obtenidos en los pasos 1 y 2 es el peso de arena necesario para llenar el cono y el espacio en la placa de base. Repetir esta serie de pasos hasta obtener un segundo valor. Promediar los dos valores y ponerlos en el tablero.
4. Tomar el promedio de los valores obtenidos para el peso de material retenido en el cono y el espacio de la placa (*si todos los grupos tienen el mismo cono de arena*) como el valor a usar en el formato respectivo.

¹Después de llevar a cabo el procedimiento D que sigue a continuación

Para calibrar el aparato del balón, se recomienda el siguiente procedimiento:

1. Colocar la placa sobre una superficie plana y obtener una lectura de cero bombeando con agua contra dicha superficie plana.
2. A continuación, colocar la placa de base sobre el molde patrón de compactación u otro recipiente de volumen conocido que no introduzca peligro de ruptura del balón.
3. Colocar el aparato del balón sobre la placa y bombear el balón en el molde por lo menos tres veces. Tomar el promedio de las tres lecturas finales (las cuales deberían ser casi idénticas). Tratar de utilizar la misma presión de balón que se utilizó en el campo (bien por estimación o por lectura de manómetro).
4. La diferencia entre los promedios de lectura de cero y final constituyen el volumen medido del recipiente ΔR .

$$\Delta R = \text{lectura final} - \text{lectura de cero}$$

5. El factor de corrección FC se calcula por regla de tres, así:

$$\Delta R (FC) = \text{volumen conocido}$$

de lo que se obtiene que el factor de corrección es:

$$FC = \frac{\text{Volumen conocido}}{\Delta R} \quad (10-4)$$

Todos los grupos deben registrar en el tablero el factor de corrección obtenido de forma que se pueda obtener un promedio para toda la clase. Si el FC es demasiado pequeño para afectar la densidad de campo más de 0.01, se puede despreciar.

El Informe

La discusión debe comentar las limitaciones posibles de este procedimiento. En el capítulo "conclusiones" se debe mostrar una tabulación de la densidad de la arena y el peso de la arena necesario para llenar el cono. Listar además el factor de corrección para la densidad del balón. Registrar las densidades húmeda y seca obtenidas en el campo junto con los datos obtenidos para contenido de humedad. Comparar los dos métodos de determinar la densidad en el terreno. En el capítulo "discusión" responder las siguientes preguntas:

1. ¿Qué material(es) distinto(s) de la arena pueden utilizarse para encontrar el volumen del agujero?
2. ¿Qué problemas pueden presentarse al usar el aparato de densidad del balón en suelos sueltos o suelos de baja plasticidad?

Experimento N° 11

COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD—MÉTODO DE CABEZA CONSTANTE

Referencias

AASHTO T125-66

ASTM D2434-68

Bowles, J. E. (1973), El Coeficiente de Permeabilidad Utilizando un Nuevo Equipo Plástico, *Highway Research Record No. 431*, pp. 55-61.

Johnson, A. I. y R. C. Richter (1976) Bibliografía Seleccionada sobre Ensayos de Permeabilidad y Capilaridad en Suelos y Rocas, *ASTM STP No. 417*, pp. 176-210.

Mitchell, J. K., D. R. Hooper, y R. C. Campanella (1965), Permeabilidad de Arcillas Compactadas, *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE SM 4*, Julio, pp. 41-65.

Mitchell, J. K. y J. S. Younger, (1967), Anormalidades en el Flujo Hidráulico a través de Suelos Finos, *ASTM STP No. 417*, pp. 106-141.

Terzaghi, K., (1925) Principios de Mecánica de Suelos-III, *Eng. New Record*, Vol. 95, p. 832.

Objetivo¹

Introducir al estudiante a un método de determinación del coeficiente de permeabilidad en un suelo granular.

Equipo

Aparato de permeabilidad (Fig. 11-1 o Fig. 12-1)

Cronómetro

Termómetro

Cilindro Graduado

Exposición General

El coeficiente de permeabilidad es una constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso. Existen dos métodos generales de laboratorio para determinar directamente el coeficiente de permeabilidad de un suelo. Estos son los llamados *método de la cabeza constante* descrito en el presente experimento, y el *método de la cabeza variable* del experimento N.º 12. Ambos métodos se basan en el uso de la ley de Darcy

$$v = ki$$

y la velocidad correspondiente del flujo es:

$$q = kiA$$

¹ El autor solicita que los experimentos Nos. 11 y 12 se hagan en el mismo período de laboratorio sobre la misma muestra de suelo.

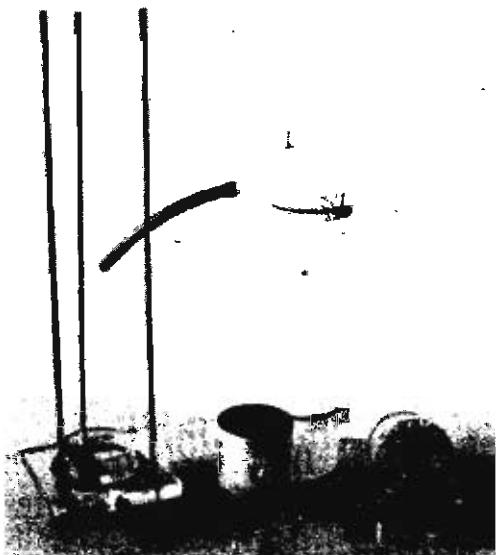


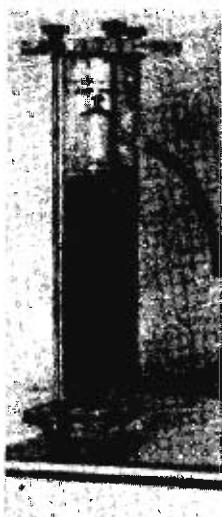
Figura 11-1

Aparato para permeabilidad de suelos granulares diseñado por el autor.

(a) Desarmado; las dos piezas de los extremos se sujetan por medio de varillas roscadas; la pieza que se aprecia en primer término contiene la base superior de la muestra, una malla No. 200 y un rebosadero de excesos como el mostrado en la Fig. 11-1c; la pieza de la base incluye una malla No. 200 y el difusor mostrado cuyo fin es repartir el agua sobre la base de la muestra.



(b) Construcción de la muestra — se aprecia la arena seca, pero puede utilizarse humeda también. Con mucho cuidado en la preparación puede llegarse a obtener densidades razonablemente altas.



(c) Saturación de la muestra con flujo ascendente de agua. Nótese que no hay posibilidad de inducir cambios de volumen cuando se arme el aparato, independientemente del gradiente hidráulico.



(d) Flujo de agua a través de la muestra, sobre el rebosadero de exceso y a través del tubo de escape a medida que se hace el ensayo.



(e) Sistema de cabeza constante. Nótese el flujo de exceso en el recipiente que se encuentra al extremo de la tubería de entrada para controlar la cabeza en dicha tubería.

donde: q = cantidad de flujo por unidad de tiempo

k = coeficiente de permeabilidad (unidades de velocidad)

i = gradiente hidráulico = h/L

h = diferencia de cabezas hidráulicas a lo largo de la muestra

L = longitud de la muestra a través de la cual se mide h

A = área de la sección transversal de la masa de suelos en consideración

Ni el ensayo de cabeza constante ni el de cabeza variable permiten obtener valores del coeficiente de permeabilidad de un suelo demasiado confiables. Existen muchas razones para esto, pero las principales son las siguientes:

1. El suelo que se utiliza en el aparato de permeabilidad nunca es igual al suelo que se tiene en el terreno — siempre estará algo alterado.
2. La orientación *in situ* de los estratos con respecto al flujo de agua es probablemente diferente en el laboratorio. En arenas, la relación entre el flujo horizontal y el flujo vertical puede ser entre 3 y 4 veces mayor ($k_h/k_v = 3$ ó más), en la generalidad de los casos. En el laboratorio, aún si se duplica adecuadamente la relación de vacíos para la arena, la relación entre k_h/k_v se perderá probablemente. Los rellenos arcillosos generalmente poseen fisuración horizontal debido a la forma de su colocación y compactación en capas de 15 a 30 cm de altura. Esto produce $k_h \neq k_v$, de nuevo una situación que difícilmente se puede reproducir en el laboratorio.
3. Las condiciones de frontera son diferentes en el laboratorio. Las paredes lisas del molde de permeabilidad mejoran los caminos del flujo con respecto a los caminos naturales en el terreno. Si el suelo tiene estratificación vertical, el flujo en los diferentes estratos será diferente, y esta condición de frontera es casi imposible de reproducir en el laboratorio.
4. La cabeza hidráulica h puede ser diferente (a menudo mucho mayor) en el laboratorio, lo cual causa el lavado del material fino hacia las fronteras con una posible reducción en el valor de k . Los gradientes hidráulicos obtenidos en el terreno ($i = h/L$) varían entre 0.5 y 1.5, mientras que en el laboratorio suelen ser 5 ó más. Existe evidencia obtenida en diferentes investigaciones que hace pensar que $v = ki$ no es una relación lineal para todos los valores de i , especialmente para valores grandes [Mitchell y Younger (1967)]. Por otra parte, existe también evidencia de que en suelos finos (arcillas), puede existir un *gradiente de umbral* por debajo del cual no hay flujo [Terzaghi (1925)].
5. El efecto del aire atrapado en la muestra de laboratorio es grande aún para pequeñas burbujas de aire debido al tamaño tan pequeño de la muestra.

El *coeficiente de permeabilidad* de una masa de suelo homogénea, isotrópica depende principalmente de los siguientes factores:

1. La viscosidad del fluido en los poros (normalmente agua). A medida que la temperatura aumenta, la viscosidad del agua disminuye y el coeficiente de permeabilidad aumenta; es decir, la velocidad de flujo aumenta. El coeficiente de permeabilidad se ha normalizado a 20°C, de forma que el coeficiente de permeabilidad a cualquier temperatura T se puede expresar con respecto a k_{20} , por medio de la siguiente ecuación:

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (11-1)$$

donde η_T y η_{20} , son las viscosidades de los fluidos a la temperatura T del ensayo y a 20°, respectivamente. Es posible utilizar la viscosidad absoluta o la viscosidad cinemática del fluido en la ec. (11-1). Se pueden usar los valores de la Tabla 12-1.

2. La relación de vacíos e del suelo. Se han hecho varios intentos para correlacionar el coeficiente de permeabilidad del suelo a una relación de vacíos dada con el mismo suelo a diferente relación de vacíos [$k = f(e)$] por expresiones tales como las siguientes:

$$k_2 = k_1 \left(\frac{e_2}{e_1} \right)^2 \quad (11-2)$$

$$k_2 = k_1 \frac{e_2^3/(1+e_2)}{e_1^3/(1+e_1)} \quad (11-3)$$

Para arcillas [Terzaghi (1925)], como $k \cong 0$ a la relación de vacíos de 0.15,

$$k_2 = k_1 \frac{\eta_1 (e - 0.15)^{11}(1+e)}{\eta_2 (e - 0.15)^8 + 0.0166}$$

La ec. (11-4) debe utilizarse con mucho cuidado; es recomendable hacer ensayos de permeabilidad a diferentes relaciones de vacíos para obtener el valor de k en lugar de utilizar la ec. (11-4). En la ec. (11-4), k_1 es el coeficiente de permeabilidad cuando $e = 1.0$.

3. El tamaño y forma de los granos de suelo. Allan Hazen estudió el uso de arenas en filtros para obras hidráulicas (ca. 1890), y concluyó que para *arenas limpias y gravas* el coeficiente de permeabilidad puede expresarse aproximadamente como:

$$k = 100D_{10}^2 \quad \text{cm/s} \quad (11-5)$$

para un rango de D entre $0.1 < D_{10} < 3.0$ mm. El D_{10} que se utiliza es el diámetro correspondiente al 10% más fino en tamaño de la muestra obtenido de la curva de distribución granulométrica (obtenida en el experimento No. 5) y expresado en cm.

La presencia de partículas angulares y laminares tienden a reducir k más que cuando el suelo está compuesto predominantemente por partículas redondeadas y esféricas.

4. El grado de saturación. A medida que aumenta el grado de saturación, el coeficiente de permeabilidad aparente también se incrementa. En parte este aumento se debe a la disminución en la tensión superficial. El origen del resto del aumento se desconoce, pues es difícil determinar k a menos que se considere continuidad del flujo a través del medio. El flujo a través del medio poroso puede obtenerse únicamente considerando la cantidad que entra y sale de la masa de suelos. Como caso extremo, sería posible, en un suelo seco, tener un flujo considerable hacia la muestra sin tener flujo de salida. El cálculo de k daría $k = 0$ lo cual evidentemente es incorrecto. Las muestras usadas en laboratorio generalmente se saturan para evitar este problema, aunque en recientes investigaciones se ha tenido en cuenta condiciones donde $S < 100\%$ [Mitchell y otros (1967)].

El permeametro patrón de compactación, que utiliza el molde de 944 cm³ utilizado en el experimento patrón de compactación, es ampliamente utilizado para determinar la permeabilidad de especímen compactado, para tales como los necesarios para núcleos de presa, diques, etc. Esto no impide, sin embargo, la posibilidad de utilizar otros aparatos de permeabilidad, tales como los mostrados en la Fig. 11-1, (de tubería plástica), que pueden fabricarse directamente en el laboratorio y son relativamente baratos.

En los métodos de laboratorio, la caída hidráulica total (o pérdida de cabeza) ocurre supuestamente a través de la muestra de suelos, mientras que una pequeña pérdida de cabeza hidráulica tiene lugar a través de la piedra porosa que existe en la base del aparato de permeabilidad. Lo anterior puede evitarse construyendo el aparato como se muestra en la Fig. 11-1, de forma que la pérdida de cabeza que sucede a través de dos mallas de tamiz No. 200 en los extremos de la muestra sea completamente despreciable.

Los ensayos de laboratorio que se utilizan para determinar el coeficiente de permeabilidad del suelo, a menudo requieren el uso de agua deaireada (y algunas veces destilada). El uso de agua deaireada puede ser de gran utilidad ya que la presencia de burbujas de aire en solución en muestras pequeñas de laboratorio puede afectar bastante los resultados al compararlos con el efecto del mismo tipo de burbujas en el suelo natural. En opinión del autor, excepto para investigaciones de precisión, el uso de agua deaireada introduce un aumento cuestionable en la precisión de la determinación de k en ensayos rutinarios de laboratorio, cuando se considera las inexactitudes de todo el ensayo y el hecho de que el agua en el campo no es deaireada ni destilada. Dos procedimientos bastante simples se pueden utilizar para reducir el problema del aire en solución. Una técnica consiste en utilizar para el ensayo agua ligeramente más tibia que la temperatura del suelo, de forma que el agua se enfrié al percolar a través del suelo; esto atraerá el aire de la muestra a la solución. La otra técnica consiste en usar un gradiente i suficientemente grande, de forma que la presión obligue al aire a permanecer en solución.

Para ensayos de permeabilidad en suelos de baja permeabilidad (por ejemplo, 10^{-4} a 10^{-9} cm/s), es más práctico utilizar una muestra delgada de alrededor de una pulgada de espesor (2 a 3 cm) en un permeametro especial [Mitchell y Younger (1967)]. A manera

de alternativa, es posible calcular el coeficiente de permeabilidad a partir de los datos del ensayo de consolidación (experimento No. 13) utilizando c_v de la ec. (13-8) como:

$$k = \frac{a_n \gamma_w c_v}{1 + e} \quad (11-6)$$

cuyos términos se identifican en el experimento No. 13. Estos últimos procedimientos se encuentran fuera de los objetivos de los ensayos presentados en este texto.

Los ensayos de permeabilidad en suelos de baja permeabilidad deben hacerse muy cuidadosamente para que los resultados obtenidos tengan algún significado. El valor calculado de la permeabilidad k , se verá materialmente afectado por cualquier escape en el aparato de permeabilidad, o evaporación en el recipiente de abastecimiento, o en el recipiente de recolección de agua, así como por el flujo que se pueda producir en la interfase entre el suelo y el aparato de permeabilidad a través de caminos de baja resistencia. Como un ejemplo se puede suponer un ensayo de permeabilidad con cabeza constante, con una muestra de área $A = 81 \text{ cm}^2$ (sección transversal aprox. del molde patrón de compactación), sometida a un gradiente hidráulico i de 20 (bastante grande aún para condiciones de laboratorio) y con un coeficiente real de permeabilidad de $1 \times 10^{-6} \text{ cm/min}$. ¿Cuánta agua Q se recogerá en una hora para la determinación de k ?

Como $Q = Ait$

$$Q = (1 \times 10^{-6} \text{ cm/min})(20)(81)(60 \text{ min/h}) = 0.0972 \text{ cm}^3/\text{h}$$

Una cantidad despreciable que podría fácilmente evaporarse a medida que se recoge en el recipiente a menos que se tomen precauciones especiales. Si el agua se mueve entre la pared del permeámetro y el suelo a una velocidad de $1 \times 10^{-4} \text{ cm/min}$, será posible recoger 20 veces más cantidad de agua. Un gradiente hidráulico de 20 se encuentra muy por encima de cualquier valor in situ probable y esto también, puede restar validez a los resultados.

Procedimiento *Esta es una práctica de grupo*

1. Pesar el recipiente de material (granular) que será utilizado en el experimento.
2. Armar el aparato de permeabilidad hasta donde se necesite para colocar el suelo para el ensayo. Determinar el volumen de suelo introducido si no se había hecho antes.
3. Cada grupo debe realizar un experimento a diferente densidad de los demás. Esto se consigue colocando el suelo suelto, sometiéndolo a un tipo de vibración o introduciéndolo con suficiente esfuerzo de compactación. Registrar en el tablero la densidad de la muestra de cada grupo para evitar que haya dos grupos con la misma densidad. Tratar de variar la densidad en un máximo de 0.4 a 0.6 kN/m³ entre todos los grupos.

Si se utiliza el permeámetro patrón de compactación se recomiendan los pasos 4 a 6 en orden.

4. Colocar un disco de papel de filtro sobre la parte superior de la arena, enrasar cuidadosamente el material en el molde, colocar un empaque de caucho sobre el borde del molde, y ajustar firmemente la tapa del molde. La tapa debe tener una pieza plástica transparente a la cual se puede ajustar la entrada de la tubería del agua posteriormente. Conectar a la válvula de salida un tramo adecuadamente largo de tubería de caucho.
5. Colocar el permeámetro en una cubeta llena de agua de forma que la tapa del permeámetro quede sumergida por lo menos 5 cm debajo del nivel del agua. Asegurarse de que la válvula de salida del permeámetro esté abierta, de manera que el agua pueda entrar a través de la muestra para saturarla con una cantidad mínima de aire atrapado. Cuando el agua alcance la altura de equilibrio del tubo plástico que se conectó a la válvula de entrada del permeámetro, se puede suponer que el proceso de saturación ha concluido. Un período de 24 horas permitirá mejores resultados en la saturación, pero para el objetivo del experimento este período puede ser demasiado largo. Nótese, sin embargo, que este procedimiento puede causar una ligera expansión en la muestra dentro del molde.
6. Con el nivel de agua estabilizado en la tubería de entrada, cerrar la válvula de salida o prensar el tubo de plástico valiéndose de un artefacto adecuado. Sacar el permeá-

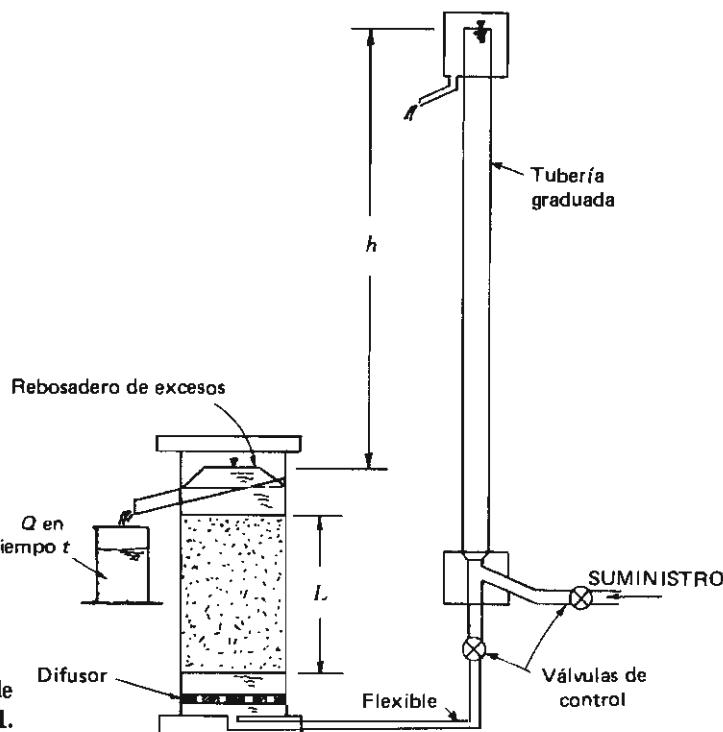


Figura 11-2

Detalles del circuito para el ensayo de cabeza constante ilustrado en la Fig. 11-1.

metro de la cubeta de inmersión, y conectar al tubo de entrada una tubería vertical conectada a su vez a un recipiente de cabeza constante.

7. Deairear las líneas de entrada a la muestra, abriendo la válvula de entrada al permeámetro y simultáneamente abriendo la válvula de drenaje que existe en la tapa superior del permeámetro (ver Fig. 12-1). Una vez se ha removido todo el aire que pudiera estar atrapado, cerrar la válvula de drenaje. Medir la cabeza hidráulica a través de la muestra.

Cuando se utilice el permeámetro plástico de Bowles (Figs. 11-1 y 11-2):

4. (a) Armar el aparato. Orientar las tuberías de entrada y salida convenientemente para la recolección de agua y la saturación/drenaje iniciales.
5. (a) Conectar la entrada del agua al recipiente de suministro. A continuación dejar saturar lentamente la muestra (por observación visual) y estabilizar la condición de flujo permitiendo que fluya agua por un tiempo. A continuación cerrar la válvula de entrada y salida y regresar al paso No. 8.
8. Utilizar un recipiente de 500 ó 1000 ml (mayor si es posible) para recibir el agua a la salida del permeámetro. Registrar el tiempo necesario para almacenar entre 750 y 900 ml de agua. Registrar también la temperatura del agua y repetir dos o tres mediciones similares adicionales utilizando un tiempo constante ($t = \text{constante}$). La cantidad de agua recogida en ensayos sucesivos es decreciente; esto debe considerarse en la "Discusión" del informe.

Registrar todos los datos del experimento en el formato respectivo de ensayo.

9. Cada grupo debe calcular su valor de k para la temperatura del ensayo. Igualmente cada grupo debe calcular k_{20} para el ensayo (con $t = \text{constante}$, T debería ser constante si el montaje es estable, de forma que es posible promediar Q y calcular un valor único para k_T ; si no se cumplen estas condiciones, es necesario calcular el valor particular de k_T para cada ensayo y los correspondientes valores de k_{20}). Colocar el promedio de los valores de k_{20} en el tablero junto al valor de la densidad. Obtener las correcciones de temperatura para la viscosidad a partir de la Tabla 12-1. El coeficiente de permeabilidad se calcula como:

$$k = \frac{QL}{Aht} \quad \text{cm/s}$$

Localización del proyecto UNIV. DE BRADLEY (USANDO PERMEATRO DE LA FIG. 11-1)Descripción del suelo ARENA MED. GRUESA CON TRAZAS DE GRAVAS, PARDASRealizado por J.E.B Fecha de la práctica 6-7-76Dimensiones de la muestra: Diám. 7.62 cm; Área 45.6 cm²; Altura 20.32 cmPeso inicial de suelo + bandeja 2984.2 gVol. 926.7 cm³Peso final de suelo + bandeja 1427.3 gPeso unitario 16.50 kN/mPeso de la muestra 1556.9 g*Cabeza constante*

$$h = 87.0 \text{ cm}$$

*Datos del experimento**Datos usados del ensayo*

Experimento No.	t, s	Q, cm ³	T, °C	Experimento No.	t, s	Q, cm ³	T, °C
1	180	775	23		180	775	
2	"	772	22		"	772	
3	"	761	22		"	761	
4							
				Promedio ^a	180	769.3	22

$$k_T = QL/Aht = \frac{769.3(20.32)}{45.6(87)(180)} = 0.9531$$

$$= 0.022 \text{ cm/s} \quad k_{20} = k_T \eta_T / \eta_{20} = 0.021 \text{ cm/s}$$

Cabeza Variable

Tubería = [bureta, otra (especificar)] _____

Área de la tubería, $a =$ _____ cm²*Datos del Ensayo^b**Datos Usados del Ensayo*

Ensayo No.	h_1 , cm	h_2 , cm	t, s	$Q_{in.}$, cm ³	$Q_{out.}$, cm ³	T, °C	Test no	h_1 , cm	h_2 , cm	t, s	T, °C
1											
2											
3											
4											
							Promedio				

$$\eta_T / \eta_{20} =$$

$$k_T = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} = \text{_____} = \text{_____} \text{ cm/s}$$

$$k_{20} = k_T \eta_T / \eta_{20} = \text{_____} = \text{_____} \text{ cm/s}$$

^aUsar valores promedio únicamente si existe muy poca diferencia en la temperatura del Experimento, por ejemplo 1-2°C.^bEste Experimento puede simplificarse considerablemente utilizando los mismos valores h_1 y h_2 cada vez, de otra forma es imposible promediarlos independientemente de T.

Figura 11-3

Datos de un experimento de permeabilidad con cabeza constante utilizando el equipo de la Fig. 11-1.

Verificar que las unidades registradas en los cálculos sean consistentes (como, por ejemplo, cm/s) para todos los grupos.

10. Utilizando un valor de G_s designado por el instructor (o estimado de acuerdo con el tipo de suelo), calcular la relación de vacíos e para cada densidad y hacer una gráfica de k_{20} contra e . Dibujar una curva suave y continua a través de dichos puntos (despreciar los puntos que no caigan en una tendencia razonablemente suave).
11. Encontrar una ecuación que ajuste adecuadamente los puntos de la curva dibujada. Dibujar esta ecuación sobre la curva del paso 10, utilizando un lápiz de color (diferente del rojo) o con un trazo punteado
Además dibujar la curva de:

$$k = k_1 \left(\frac{e_2}{e_1} \right)^2$$

en el gráfico utilizando un color diferente, como una segunda comparación. Limitar el rango de e entre 0.4 y 1.1.

12. Calcular la velocidad aproximada del agua como:

$$v_a \approx \frac{1+e}{e} v \quad (\text{cm/s})$$

para el experimento.

13. En el informe:

- a. Comparar las ecuaciones del paso 11 con la curva experimental. ¿Qué tal es la comparación con la ecuación aproximada en el paso 11 en particular?
- b. ¿Indican las velocidades registradas la posibilidad de flujo turbulento?
- c. ¿La disminución en la cantidad de agua que fluye a través de la muestra en cada repetición sucesiva, se debe a la formación de una barrera en el filtro por acumulación de finos, o a la salida de aire en solución en el agua? ¿Qué puede hacerse para producir una condición de $Q = \text{constante}$?
- d. Discutir los cambios que puedan hacerse para mejorar desde su punto de vista este experimento práctico.

Experimento N° 12

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD—MÉTODO DE LA CABEZA VARIABLE

Referencias

Ver experimento No. 11.

Objetivo

Introducir al estudiante a un método de determinación del coeficiente de permeabilidad de suelos finos (arenas finas tales como limos o arcillas). El experimento puede también utilizarse para suelos de grano grueso.

Equipo

Aparato de permeabilidad

Cronómetro

Termómetro

Templete con mástil y soporte para agarrar tubos de ensayo o similar que permitan desarrollar una cabeza hidráulica diferencial a través de la muestra.

Bureta (para utilizarla con el templete o cualquier otro tipo de soporte).

Exposición general

La exposición general del experimento No. 11 es aplicable también a este experimento. Las limitaciones del ensayo de cabeza constante son inherentes a este experimento, y además, si el experimento tiene una duración excesiva, será necesario controlar la evaporación del agua en la tubería de entrada (Fig. 12-1).

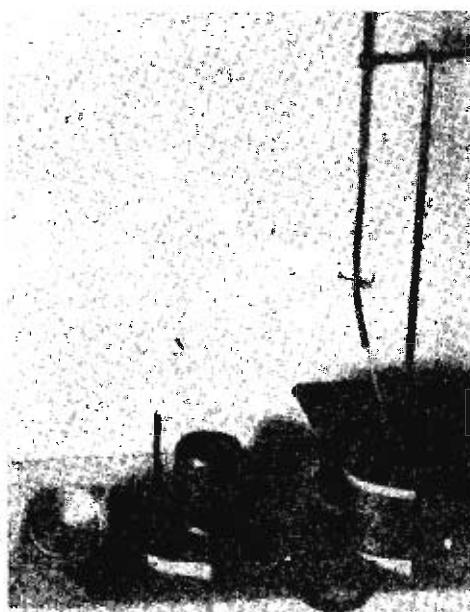
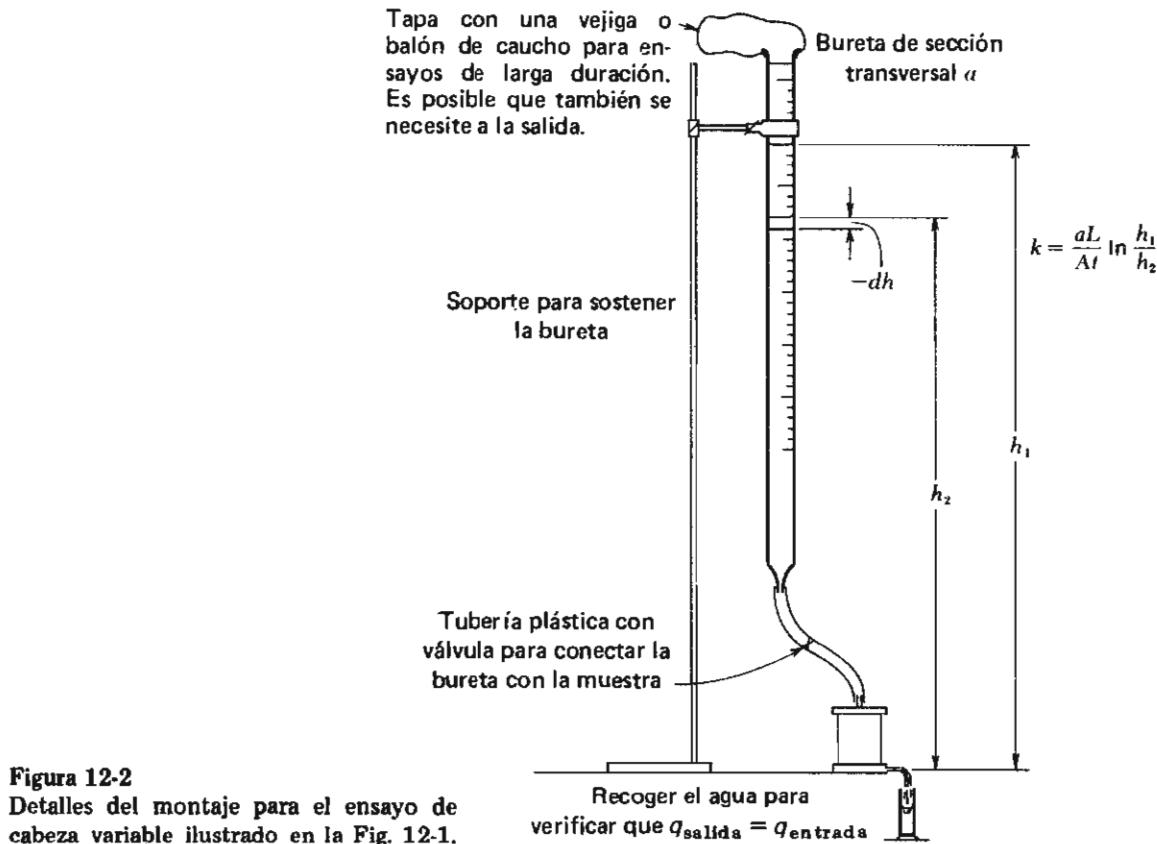


Figura 12-1

Experimento de permeabilidad con cabeza variable usando como permeámetro el molde patrón de compactación. Se muestran un aparato desarmado y otro montado con bureta de 100 ml. Nótese que el grueso espesor de la piedra porosa y el pequeño diámetro del agujero de entrada en la tapa superior del permeámetro pueden originar una depresión en la muestra por erosión debido a gradientes hidráulicos muy grandes. Debe tenerse mucho cuidado en el montaje del aparato para evitar fugas. Usar una regla métrica para medir las cabezas hidráulicas, h_1 y h_2 . Para gradientes muy pequeños es importante tener cuidado de que no se drene la muestra.

La ecuación aplicable a este experimento puede deducirse fácilmente (véase la Fig. 12-2), pero se deja como parte del ejercicio de cálculo del estudiante en su informe y se presenta simplemente como:

$$k = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2}$$



donde a = área de la sección transversal de la bureta o tubería de entrada (Fig. 12-2), cm^2

A = área seccional de la muestra de suelo, en cm^2

h_1 = cabeza hidráulica a través de la muestra al comienzo de experimento ($t = 0$)

h_2 = cabeza hidráulica a través de la muestra al final del ensayo ($t = t_{\text{ensayo}}$)

L = longitud de la muestra en cm

t = tiempo transcurrido durante el experimento, en segundos

\ln = logaritmo natural (en base 2.7182818 ...)

Debe notarse que este método para determinar el coeficiente de permeabilidad k ha sido desarrollado principalmente por economía pues el experimento para determinar k en un suelo fino puede durar normalmente varios días. El experimento de cabeza constante del experimento No. 11 consume una cantidad grande de agua en el laboratorio para mantener la cabeza constante en la mayoría de los arreglos. Para ensayos de larga duración y donde la cantidad de flujo a través de la muestra es muy pequeña, es necesario controlar la evaporación de agua del recipiente o de la tubería de entrada y evitar también la evaporación y/o drenaje en la tubería o recipiente de salida. Una forma de solucionar este problema consiste en hacerlo en un salón de humedad controlada. Otra es mantener el recipiente de la tubería de entrada cubierto con un globo de caucho parcialmente inflado. (No se debe taponar el extremo de la tubería debido a que eventualmente puede formarse vacío, lo que suspendería el flujo de agua a través de la muestra). Para controlar el drenaje y garantizar

que el agua salga a tubo lleno (o para controlar la evaporación a la salida), se debe sumergir la tubería de salida en un recipiente con agua. Obtener elevación del recipiente de salida para calcular h_2 , utilizando diferentes herramientas de laboratorio. Debe hacerse gala de juicio e ingenio para controlar escapes en el conjunto.

Procedimiento *Esta es una práctica de grupo¹*

1. Preparar la muestra de suelo siguiendo las instrucciones generales del experimento No. 11.
2. Llenar la bureta (o tubería de entrada) hasta una altura conveniente y medir la cabeza hidráulica a través de la muestra para obtener h_1 .
3. Iniciar el flujo de agua y echar a andar simultáneamente el cronómetro. Dejar que el agua corra a través de la muestra hasta que la bureta (o tubería de entrada) se encuentre casi vacía. Simultáneamente parar el flujo y registrar el tiempo transcurrido. Obtener la cabeza h_2 . Registrar la temperatura del ensayo.

Si es necesario registrar el área de la tubería de entrada a , se puede recoger el agua en un recipiente tipo beaker.

4. Volver a llenar la bureta (o tubería de entrada) de agua y repetir el ensayo dos veces adicionales. Utilizar los mismos valores para h_1 y h_2 y obtener los tiempos transcurridos correspondientes. Hacer mediciones de temperatura para cada ensayo.

Si es necesario calcular el área de la tubería, recoger el agua para cada experimento y *acumularla* en un cilindro graduado. Después de terminado el último experimento obtener el Q_{ensayo} promedio como:

$$Q_{ensayo} = \frac{Q_{total}}{\text{no. de ensayos}}$$

a partir del cual se puede calcular fácil y bastante aproximadamente el valor de a . Este cálculo no es necesario si se utiliza una bureta graduada.

Si el ensayo se hace con el Experimento No. 11 y no se han obtenido aún datos para el ensayo de cabeza constante, tomar datos para dicho ensayo a continuación¹.

5. Cada persona debe calcular el coeficiente de permeabilidad a la temperatura del ensayo, k_T y a 20°C. Obtener correcciones para viscosidad del agua a partir de la Tabla 12-1. Utilizar el formato correspondiente. Promediar los resultados para k (nótese que un valor único puede calcularse si no hay variación en la temperatura mayor de 1 a 2°C y si se utilizó h_1 y h_2 = constante para todos los diferentes ensayos, ya que el tiempo puede ser promediado en esas condiciones).

Referirse a la Fig. 12-3 como ejemplo de un conjunto típico de datos del ensayo de cabeza variable.

6. Incluya en su informe lo siguiente:

- a. Discutir las limitaciones del ensayo (específicamente para el montaje que se hizo en el laboratorio).
- b. ¿Es posible proponer una forma mejor (o más práctica) de hacer el ensayo?
- c. Comparar los valores de k obtenidos en los experimentos 11 y 12 (si se hicieron ambos sobre la misma muestra). ¿Cuál sería la causa principal de las diferencias de los dos valores?
- d. Incluir en los cálculos la deducción de la ec. (12-1).
- e. ¿Cuánto tiempo transcurriría para disminuir h_2 a 0?

¹ El autor hace el Experimento No. 11 primero, pero el orden puede ser alterado a gusto del instructor.

Tabla 12-1 Corrección de Viscosidad para $\eta T/\eta_{20}$

°C	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10	1.3012	1.2976	1.2940	1.2903	1.2867	1.2831	1.2795	1.2759	1.2722	1.2686
11	1.2650	1.2615	1.2580	1.2545	1.2510	1.2476	1.2441	1.2406	1.2371	1.2336
12	1.2301	1.2268	1.2234	1.2201	1.2168	1.2135	1.2101	1.2068	1.2035	1.2001
13	1.1968	1.1936	1.1905	1.1873	1.1841	1.1810	1.1777	1.1746	1.1714	1.1683
14	1.1651	1.1621	1.1590	1.1560	1.1529	1.1499	1.1469	1.1438	1.1408	1.1377
15	1.1347	1.1318	1.1289	1.1260	1.1231	1.1202	1.1172	1.1143	1.1114	1.1085
16	1.1056	1.1028	1.0999	1.0971	1.0943	1.0915	1.0887	1.0859	1.0803	1.0802
17	1.0774	1.0747	1.0720	1.0693	1.0667	1.0640	1.0613	1.0586	1.0560	1.0533
18	1.0507	1.0480	1.0454	1.0429	1.0403	1.0377	1.0351	1.0325	1.0300	1.0274
19	1.0248	1.0223	1.0198	1.0174	1.0149	1.0124	1.0099	1.0074	1.0050	1.0025
20	1.0000	0.9976	0.9952	0.9928	0.9904	0.9881	0.9857	0.9833	0.9809	0.9785
21	0.9761	0.9738	0.9715	0.9692	0.9669	0.9646	0.9623	0.9600	0.9577	0.9554
22	0.9531	0.9509	0.9487	0.9465	0.9443	0.9421	0.9399	0.9377	0.9355	0.9333
23	0.9311	0.9290	0.9268	0.9247	0.9225	0.9204	0.9183	0.9161	0.9140	0.9118
24	0.9097	0.9077	0.9056	0.9036	0.9015	0.8995	0.8975	0.8954	0.8934	0.8913
25	0.8893	0.8873	0.8853	0.8833	0.8813	0.8794	0.8774	0.8754	0.8734	0.8714
26	0.8694	0.8675	0.8656	0.8636	0.8617	0.8598	0.8579	0.8560	0.8540	0.8521
27	0.8502	0.8484	0.8465	0.8447	0.8428	0.8410	0.8392	0.8373	0.8355	0.8336
28	0.8318	0.8300	0.8282	0.8264	0.8246	0.8229	0.8211	0.8193	0.8175	0.8157
29	0.8139	0.8122	0.8105	0.8087	0.8070	0.8053	0.8036	0.8019	0.8001	0.7984
30	0.7967	0.7950	0.7934	0.7917	0.7901	0.7884	0.7867	0.7851	0.7834	0.7818
31	0.7801	0.7785	0.7769	0.7753	0.7737	0.7721	0.7705	0.7689	0.7673	0.7657
32	0.7641	0.7626	0.7610	0.7595	0.7579	0.7564	0.7548	0.7533	0.7517	0.7502
33	0.7486	0.7471	0.7456	0.7440	0.7425	0.7410	0.7395	0.7380	0.7364	0.7349
34	0.7334	0.7320	0.7305	0.7291	0.7276	0.7262	0.7247	0.7233	0.7218	0.7204
35	0.7189	0.7175	0.7161	0.7147	0.7133	0.7120	0.7106	0.7092	0.7078	0.7064

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (Cabeza Variable)

Formato 13

Proyecto EXPERIMENTO DE CABEZA VARIABLE Trabajo No. Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY (MOLDE DE COMP. ESTANDAR)Descripción del Suelo ARENA MUY FINA, PARDIA CLARARealizado por J.E.B. Fecha de la práctica 7-9-76Dimensiones de la Muestra: Diám. 10.2 cm; Área 81.1 cm²; Ht. 11.6 cmPeso inicial de suelo + bandeja 3074.9 g Vol. 944.0 cm³Peso final de suelo + bandeja 1525.1 g Peso unitario 16.10 kN/m³Peso de la muestra 1549.8 g

Cabeza Constante

 $h = \underline{\hspace{2cm}}$ cm

Datos del experimento

Datos usados del experimento

Experimento No.	t, s	Q, cm ³	T, °C	Experimento No.	t, s	Q, cm ³	T, °C
1							
2							
3							
4				Promedio ^a			

$$k_T = QL/Aht = \underline{\hspace{2cm}} \quad \eta_T/\eta_{20} = \underline{\hspace{2cm}} \\ = \underline{\hspace{2cm}} \text{cm/s} \quad k_{20} = k_T \eta_T/\eta_{20} = \underline{\hspace{2cm}} \text{cm/s}$$

Cabeza Variable

Tubería = [bureta, otra (especificar)] 100 ml. bureta ✓Área de la tubería, $a = \underline{\hspace{2cm}}$ cm² ✓Datos del Experimento^b

Datos Usado del Experimento

Exp. no.	h_1 , cm	h_2 , cm	t, s	Q_{in} , cm ³	Q_{out} , cm ³	T, °C	Exp. no.	h_1 , cm	h_2 , cm	t, s	T, °C
1	<u>51.1</u>	<u>24.3</u>	<u>54.1</u>		<u>45.8</u>	<u>21</u>					
2	<u>51.1</u>	<u>24.3</u>	<u>54.7</u>		"	"					
3	<u>51.1</u>	<u>24.3</u>	<u>55.3</u>		"	"					
4											
							Promedio	<u>51.1</u>	<u>24.3</u>	<u>54.7</u>	<u>21</u>

$$a = \frac{45.8}{51.1 - 24.3} = 1.71 \text{ cm}^2$$

$$\eta_T/\eta_{20} = \frac{0.9761}{1.71(11.6)} \ln \frac{51.1}{24.3} = 3.32 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

$$k_T = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{81.1(54.7)}{81.1(54.7)} \ln \frac{51.1}{24.3} = 3.24 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

^a Usar valores promedio únicamente si existe muy poca diferencia en la temperatura del experimento, por ejemplo 1-2°C.^b Este experimento puede simplificarse considerablemente usando los mismos valores h_1 y h_2 cada vez, de otra forma es imposible promediarlos independientemente de T.

Figura 12-3

Datos de un ensayo de permeabilidad con cabeza variable utilizando el molde de compactación estándar con los detalles generales de la Fig. 12-1.

Experimento N° 13

EXPERIMENTO DE CONSOLIDACION

Referencias

AASHTO T216-66

ASTM D2435-70

AASHTO (1976), Estimación de Asentamiento por Consolidación, *Transportation Research Board, Special Report No. 163* (con varias referencias).

Casagrande, A. (1936), La Determinación del Esfuerzo de Preconsolidación y su Significado Práctico, *Proc. 1 st Conf. Soil Mech. Found. Eng. Harvard*, Vol. 3, pp. 60-64.

Crawford, C. B. (1964), Interpretación del Ensayo de Consolidación, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, SM 5*, Septiembre, pp. 87-102.

Leonards, G. W. y A. G., Altschaeffl (1964), Compresibilidad de las Arcillas, *J. Soil Mech Found Div., ASCE, SM 5*, septiembre, pp. 133-156.

Lo, K. Y. (1961) Compresión Secundaria de Arcillas, *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE, SM 4*, Agosto, pp. 61-87.

Equipo

Consolidómetro¹ (véase Fig. 13-1).

Deformímetro de carátula² con lectura de 0.01 mm de precisión (ó 0.0001").

Equipo de cargas

Cronómetro de bolsillo o de pared

Equipo necesario o disponible para moldeo de la muestra

Exposición general

Cuando se somete un suelo a un incremento en presión (o carga), ocurre un reajuste de la estructura de suelo que podría considerarse primeramente como una *deformación plástica* correspondiente a *una reducción en la relación de vacíos*. Puede producirse también una pequeña cantidad de *deformación elástica* pero considerando la magnitud de las cargas (o presiones de contacto) involucradas y el hecho de que el módulo de elasticidad de los granos de suelo sea del orden de 20 MPa la deformación elástica (la cual es recuperable cuando la carga se remueve) es despreciable.

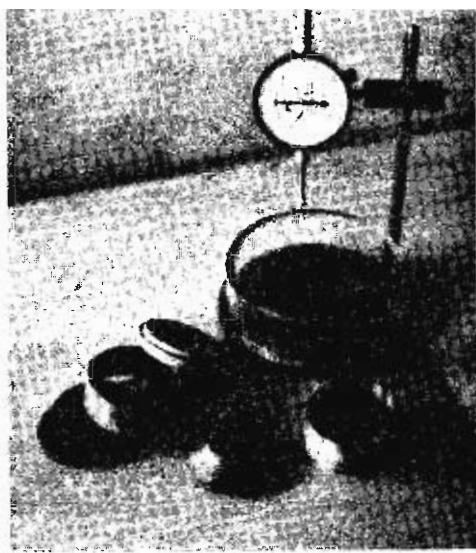
¹ El consolidómetro patrón de 2.5" puede convertirse al sistema SI [para usar el sistema de carga $\frac{1}{4}$ de tonelada por pie cuadrado ($t/ft^2 = 25$ kilopascales (kPa); $\frac{1}{2} t/ft^2 = 50$ kPa; $1 t/ft^2 = 100$ kPa etc.] de la siguiente forma: (a) comprar un pedazo de tubería de bronce de diámetro externo e interno apropiado para tornear un nuevo diámetro externo de 62.14 mm (contra 63.5 mm del anillo de $2\frac{1}{2}"$), con una altura de 24 mm; (b) tornear adecuadamente una pieza de bronce o aluminio para producir un disco de moldeo con pistones de 2 mm y 4 mm para reducir la muestra a un tamaño final de 20 mm (véase Fig. 13-1). (c) Utilizar un disco de esmeril para limar cuidadosamente las piedras porosas hasta el nuevo diámetro (d) Tornear un nuevo pistón para la aplicación de carga (o disminuir en el torno las dimensiones de la existente).

² Los deformímetros de carátula utilizados generalmente tienen una precisión de 0.0001" lo cual es excesivo si se considera la forma como se obtiene la altura inicial de la muestra. El deformímetro de carátula de 0.01 mm de división tiene una precisión de 0.0004" suficiente ciertamente para el experimento.

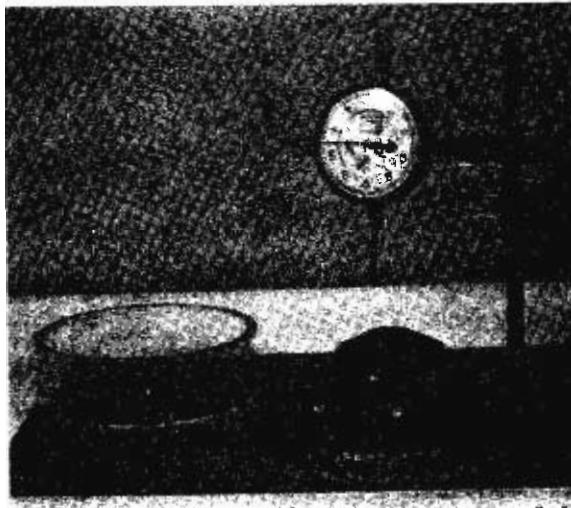
Figura 13-1

Equipo para el experimento de consolidación con anillo flotante.

(a) Equipo de consolidómetro: anillo de bronce (62.14 X 24.0 mm), anillo con borde cortante para tallar la muestra al diámetro necesario para montarla en el ensayo de consolidación; dos piedras porosas, bloque o pistón de carga de bronce y disco de moldeo para recortar la muestra 2 y 4 mm (la profundidad de 4 mm debe orientarse hacia arriba). La muestra debe ajustarse arriba y abajo con las piedras porosas en la base del consolidómetro la cual a su vez ha sido retrocedida para permitir el alineamiento correcto. El anillo de plástico que rodea la muestra y ajusta en el surco torneado en la base (engrasar con grasa de silicona) tiene como fin permitir la saturación de la muestra (añadir agua a medida que se evapore para mantener siempre el nivel de agua por encima de la piedra porosa superior). Un consolidómetro de anillo fijo es muy similar, y si el peso del consolidómetro es igual (añadir metal o usar un taladro para remover metales en caso de necesidad), puede usarse el mismo sistema de carga para ambos.



(b) Después de colocar la muestra en el anillo, usar el disco de moldeo para extruir 2 mm, cortar este sobrante y colocar un disco de papel de filtro para evitar la adherencia. A continuación, sacar el disco de moldeo, pasarlo al otro extremo, usar el lado de 4 mm para empujar la muestra a través del anillo, recortar el sobrante (lo cual produce el espesor adecuado en la muestra) y colocar un segundo papel de filtro. Finalmente, remover el disco de moldeo, colocar las piedras porosas y centrar la muestra en el anillo.



(c) Colocar el anillo con la muestra en la base del consolidómetro y añadir el pistón de carga.



(d) Ajustar el anillo plástico externo después de engrasar cuidadosamente el surco y llenar parcialmente de agua para verificar que no haya fugas. Si existen fugas es necesario remover el anillo y volver a engrasar. Si no hay fugas, ajustar el sistema de carga y comenzar el ensayo.



(e) Ensayo en curso utilizando un sistema de carga en el laboratorio del autor. Nótese el deformímetro en su lugar y una carga aplicada de 200 kPa (4 placas de carga).

Cuando se aplica una carga a un suelo de grano grueso completamente seco, parcial o completamente saturado, o cuando la carga se aplica a suelo seco, el proceso de deformación plástica con reducción en la relación de vacíos tiene lugar en un período de tiempo tan corto que es posible considerar instantáneo todo el proceso. Esto puede explicarse en suelos secos por el hecho de que el aire encerrado en los poros tiene muy poca viscosidad y es muy fácilmente comprimido; de esa forma los sólidos no presentan ninguna resistencia al flujo hacia afuera del fluido de los poros (aire, en este caso) a medida que los vacíos del suelo se reducen. En el caso de un suelo de grano saturado o parcialmente saturado, el coeficiente de permeabilidad k es suficientemente grande para que el agua de los poros pueda también salir casi instantáneamente.

Cuando se aplica una carga a un suelo de grano fino saturado parcial o totalmente, el tiempo para lograr la deformación plástica y la reducción en la relación de vacíos es mucho mayor, y para este proceso dependerá de varios factores, entre los cuales los principales son:

1. El grado de saturación
2. El coeficiente de permeabilidad del suelo
3. Las propiedades del fluido de los poros
4. La longitud de la trayectoria que debe recorrer el fluido expulsado de la muestra para encontrar equilibrio.

Se define a continuación consolidación como la deformación plástica debida a reducción en la relación de vacíos (generalmente llamada *asentamiento*) la cual es función del tiempo, o:

$$S = f(t) \quad (13-1)$$

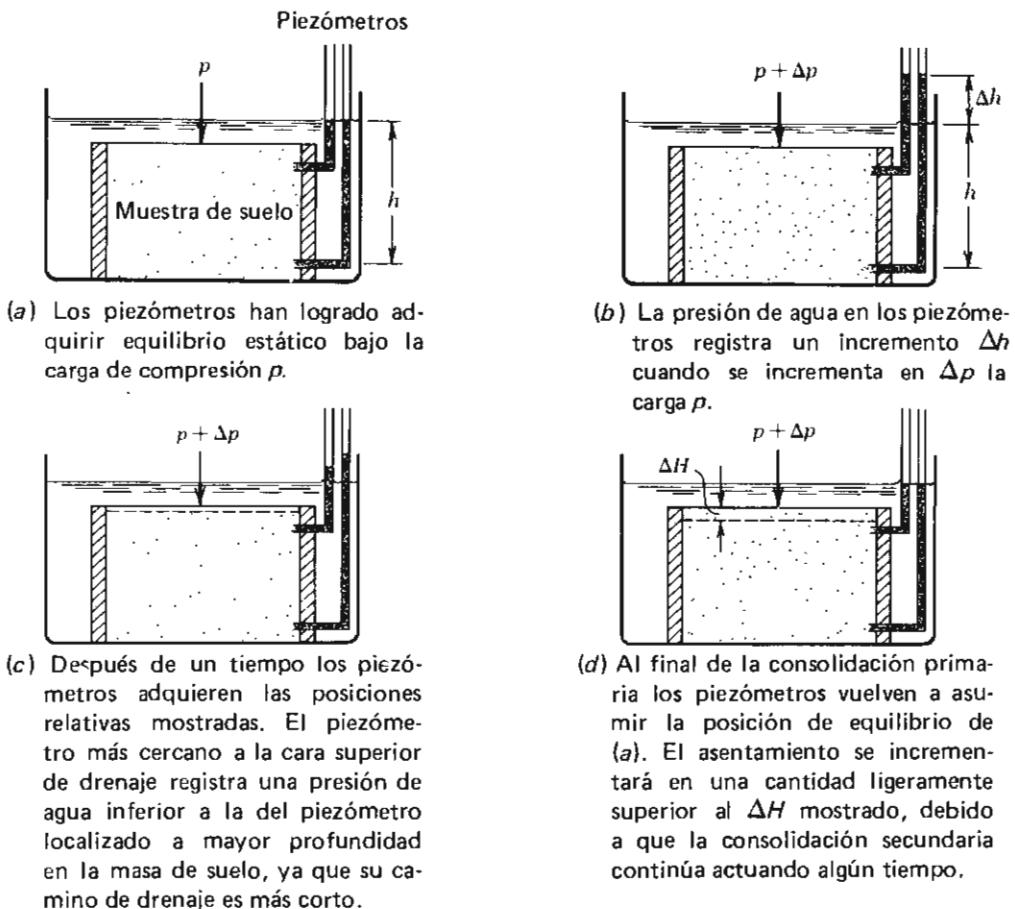


Figura 13-2
Consolidación primaria.

El estado del arte en este momento permite formular un modelo matemático para proceso de consolidación (cuya aplicación permite éxito razonable) solo en el caso de suelos totalmente saturados.

Cuando se aplica una carga a un suelo fino saturado confinado en un anillo metálico con piezómetros insertados dentro de la muestra (como se muestra en la Fig. 13-2a) el nivel de agua en todos los piezómetros se moverá hasta una altura $h + \Delta h$ inmediatamente después de aplicar la carga como se muestra en la Figura 13-2b.¹ La razón para esto es que cuando existe un bajo coeficiente de permeabilidad (como es característico en los suelos finos tales como arcillas), el agua no puede subir instantáneamente fuera de los poros. Es lógico que la carga produzca en la masa de suelo una necesidad de reducir sus vacíos (cambiar volumen) para lo cual es necesario expulsar parte del agua que se encuentra en los poros; sin embargo, se requiere tiempo para causar el flujo del agua pues ese es un proceso retardado. Como el agua no fluye instantáneamente, la carga se traduce en un incremento en la presión de poros — a partir del salto repentino de la altura del piezómetro. A medida que el agua fluye gradualmente fuera de los poros del suelo, la cabeza del piezómetro decrece, tal como se muestra en la Fig. 13-2c. Como el agua fluye de un estado de alto potencial (presión elevada) a un estado de bajo potencial y obviamente la superficie libre del agua constituye el nivel de potencial menor en este sistema, el agua que se encuentre en la masa de suelo fluye hacia la superficie del agua que rodea la masa de suelo. La longitud

¹ Esto es ficticio ya que cualquier cantidad de flujo suficiente para movilizar este Δh de forma que pueda ser visualizado, deshidrataría la muestra. El concepto es correcto esencialmente y ayuda al lector a comprender el proceso.

del camino de flujo es menor para el agua que se encuentra dentro de los poros cercanos a la superficie de la muestra (Fig. 13-2c) donde el agua puede fluir rápidamente hacia afuera, causando una reducción en cabeza más rápida en la parte superior del piezómetro que en la parte inferior localizada en una zona mucho más distante de la superficie libre del agua. Esto es también evidente a partir de la ec. de Darcy:

$$v = ki$$

En la muestra de suelo el agua debe movilizarse Δy . Para desplazarse esta distancia a la velocidad establecida por la ec. de Darcy se requiere un intervalo de tiempo, Δt tal que:

$$\Delta y = \frac{k}{L} \left(\frac{dh}{dt} \right) \Delta t$$

La consolidación (también llamada *consolidación primaria*) se considera completa cuando el nivel de agua en todos los piezómetros regresa a su nivel estático inicial, como se muestra en la Fig. 13-2d. Realmente, después de este momento se produce deformación adicional del suelo; ésta se denomina *consolidación secundaria*. No existe ningún modelo matemático confiable para describir el comportamiento del suelo en consolidación secundaria aunque se conoce que existe y que consiste en un reajuste continuado de la estructura granular por la aplicación de la carga.

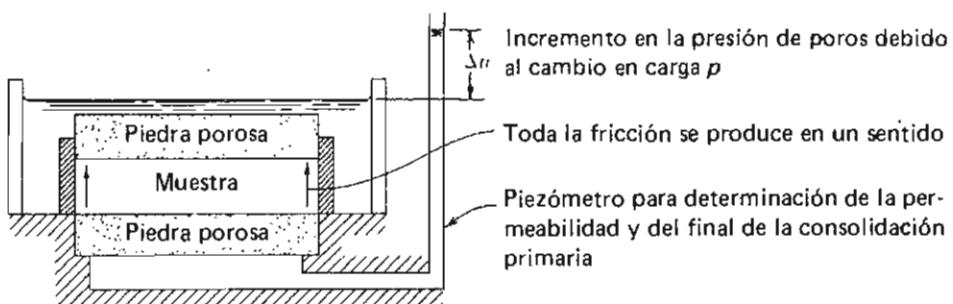
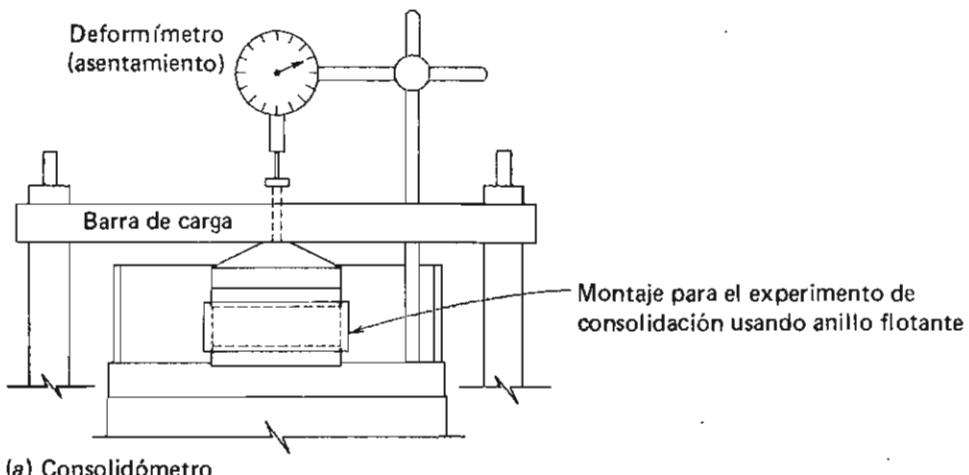
Es posible ahora redefinir la consolidación como *la deformación plástica/reducción en relación de vacíos de una masa de suelos que es función del tiempo y del exceso en presión de poros*.

El ensayo de laboratorio es *unidimensional* por el hecho de que con un anillo metálico para confinar la muestra, no se permite flujo o movimiento de agua en un sentido lateral —todo el flujo de agua y el movimiento del suelo sucede en la dirección vertical. En el terreno ocurre algo de movimiento lateral de agua, igualmente algo de movimiento lateral de suelo. Ninguno de estos efectos es probablemente tan importante cuando se considera el asentamiento global, debido a la consolidación basada en la extrapolación de resultados de laboratorio a la situación de terreno.

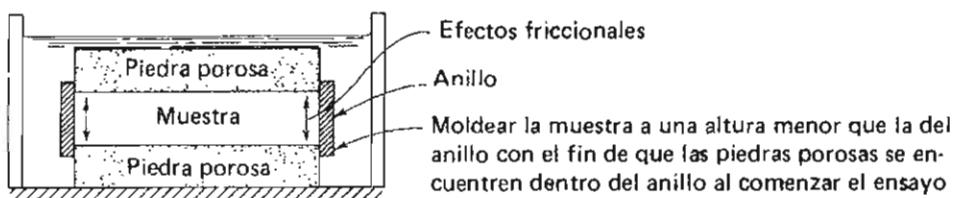
El ensayo de consolidación en el laboratorio se hace sobre una muestra que tiene entre 20 y 40 mm de espesor colocada en un anillo de metal confinante de diámetro entre 45 y 113 mm (100 cm^2). Más comúnmente se utilizan diámetros de 63 y 113 mm. El aparato puede tener anillos de tipo *fijo* o *flotante*. El *anillo fijo* puede utilizarse para medir el coeficiente de permeabilidad¹ de la muestra a medida que se hace el ensayo de consolidación. La ventaja del *anillo fijo* consiste en que reduce la pérdida por fricción a lo largo de las paredes de la muestra entre el suelo y el anillo (Fig. 13-3c) y la velocidad del ensayo es casi cuatro veces mayor. Si se mantienen todas las variables iguales, y en vista de que los defectos de la preparación de la muestra son iguales independientemente del tamaño de la muestra, es posible esperar que las muestras más grandes den porcentajes mayores de confiabilidad. De cualquier forma, el diámetro interno del anillo debería ser por lo menos 6 mm menor que el diámetro de la muestra de tubo respectiva y la relación diámetro/altura > 2.5 .

El consolidómetro Anteus se introdujo (ca. 1964) para intentar producir un ensayo de consolidación en el cual la presión de poros dentro de la muestra pudiera controlarse.

¹Este no es un procedimiento trivial y requiere establecer un montaje de ensayo de permeabilidad con cabeza variable similar al experimento No. 12. Utilizar una bureta de 100 mm con un balón de caucho para controlar la evaporación y hacer un ensayo de cabeza variable entre cada incremento de carga para obtener la relación k vs. e .



(b) Consolidómetro de anillo fijo. Puede utilizarse para obtener información sobre permeabilidad durante el ensayo de consolidación si se instala un piezómetro.



(c) Consolidómetro de anillo-flotante.

Figura 13-3

Detalles del montaje de un ensayo de consolidación típico.

Si una muestra proviene de una profundidad de 3 m, por debajo del nivel freático, durante su consolidación debe existir una presión estática de $3 \times 9.807 = 29.42$ kPa y este aparato es capaz de producir esta presión llamada *contrapresión* (o cualquier otro valor de presión).

El ensayo de consolidación se avanza aplicando cargas en una progresión geométrica con una relación incremental, $\Delta p/p = 1$ con una secuencia típica como sigue:

25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 (y algunas veces 3200) kPa.

Una secuencia alternativa de carga, dependiendo del equipo disponible, podría ser:

5, 10, 20, 40, 80, 160, ... etc., kPa

Otras relaciones incrementales de carga pueden utilizarse, pero parece que si dicha relación no es suficientemente grande, el suelo tiende a desarrollar una resistencia interna a la carga y la deformación total de la muestra será menor que la obtenida con una relación incremental de $\Delta p/p = 1$ (como las ilustradas).

Los datos del experimento de consolidación (referirse a la Fig. 13-5) se obtienen del ensayo y se utilizan de la siguiente forma:

1. Peso, dimensiones (altura y diámetro), y contenido de humedad natural inicial del espécimen utilizado en el ensayo, de forma que se pueda calcular la relación de vacíos inicial e_0 y la sección transversal del anillo A , y la altura inicial H_i de la muestra pueda establecerse.

El volumen total de la muestra puede determinarse a partir de H_i y A , pero puede también calcularse como:

$$V_t = V_s + V_w \quad (13-2)$$

donde V_s y V_w son los volúmenes de sólidos y agua respectivamente. El volumen de agua puede calcularse a partir del contenido de humedad si la determinación es confiable, al comienzo del experimento como:

$$V_w = \frac{wW_s}{G_w\gamma_w} = wW_s \quad (13-3)$$

como la gravedad específica y el peso unitario del agua pueden tomarse como 1.00 sin error apreciable.

El volumen de agua final del ensayo V_{wf} puede conocerse al determinar la cantidad de agua que se evapora en el proceso de secado al horno de la muestra al final del ensayo. En ese momento la saturación S debe ser 100% (aunque podría ser ligeramente menor al comienzo)¹. Este procedimiento de obtención del volumen de agua, y conjuntamente con las dimensiones iniciales de la muestra, el volumen inicial de agua V_w de la ec. (13-3), es preferido por el autor.

La altura equivalente de los sólidos (altura de la masa de sólidos en el diagrama de fases) puede calcularse fácilmente después de secar al horno la pastilla de hielo resultante y conociendo el cambio total en altura ΔH durante el ensayo, de la siguiente forma:

$$H_f = H_{\text{inicial}} - \Delta H \quad (\text{altura inicial de la muestra y utilizar las lecturas del deformímetro})$$

$$V_{\text{final}} = H_f \times A = H_s \times A + V_{wf} \quad (\text{volumen} = \text{sólidos} + \text{agua}).$$

de lo cual se puede obtener la altura de los sólidos H_s , como:

$$H_s = H_f - \frac{V_{wf}}{A} \quad (13-4)$$

y A = área del anillo de consolidación.

La altura inicial de vacíos puede calcularse como:

$$H_v = H_{\text{inicial}} - H_s \quad (13-5)$$

y la relación de vacíos inicial e_i , es:

$$e_i = \frac{H_v}{H_s} \quad (13-6)$$

Un control adicional del valor calculado de H_s se obtiene si se conoce la gravedad específica de los suelos; a manera de alternativa, se puede calcular G_s de H_s y el peso de sólidos W_s y si el valor no es razonable, es posible intentar algún método de reconciliación entre los diferentes ítems de información del ensayo para obtener valores razonables tanto de H_s como de G_s .

2. La cantidad de deformación producida a la muestra bajo una carga dada se registra como parte de los datos del ensayo a diferentes intervalos de tiempo. Esta información se obtiene ajustando un deformímetro de carátula (con precisión de 0.01 mm/división-recomendación del autor; la ASTM sugiere 0.0025 mm/división, pero esto puede ser demasiado preciso, como se comentó antes) para tomar mediciones de la deformación de la muestra

¹ Debido a que tanto la expansión debida a la descarga de los esfuerzos naturales en el campo como la descarga consecuente en la presión del agua, permiten la expansión del aire en solución al agua de los poros.

a ciertos intervalos de tiempo. El intervalo de tiempo total para consolidar la muestra bajo un incremento de carga dado puede ser entre 24 y 48 horas o más y para poder dar a todas las lecturas la misma importancia los gráficos se presentan usualmente en una gráfica semilogarítmica de lectura del deformímetro (DR) contra tiempo (tiempo en la escala logarítmica) en minutos para cada incremento de carga. La mayor parte de la compresión total de la muestra ocurre en los primeros instantes después de la aplicación de la carga, por consiguiente es necesario dar a esta parte de la curva tanta importancia como la que se da a la parte final de la curva.

Algunas veces los datos tiempo-asentamiento se presentan como una gráfica de lectura del deformímetro contra $\sqrt{\text{tiempo}}$ (nuevamente en minutos). Este método de presentación de la información se debe a D.W. Taylor, quien encontró que producía resultados razonablemente confiables para las arcillas del área de Boston, Massachusetts.

Es importante observar que una gráfica de la deformación del dial contra el tiempo es igual a una gráfica de compresión de la muestra contra el tiempo, ya que las diferencias entre dos lecturas consecutivas del deformímetro determina la compresión de la muestra en el intervalo de tiempo correspondiente.

A partir de una gráfica de lecturas del deformímetro contra logaritmo del tiempo ($\text{o } \sqrt{\text{tiempo}}$), como se muestra en las Figs. 13-6a y 13-6b, se puede obtener D_{100} (la lectura correspondiente al 100% de consolidación, o $U = 100\%$), D_0 , D_{50} , y los tiempos correspondientes t_{100} , t_{50} , etc. para que esto ocurra, y para cada incremento de carga.

a. Para obtener D_{100} (el cual se define arbitrariamente) a partir de la lectura de deformación contra logaritmo del tiempo, es necesario dibujar tangentes en la parte central y final de la curva como se muestra en la Fig. 13-6a. En la intersección de las tangentes, proyectar horizontalmente hasta el eje de las ordenadas para leer D_{100} . Para obtener t_{100} (el tiempo al cual ocurre esta cantidad de compresión), se debe proyectar horizontalmente desde la intersección de las tangentes hasta la curva, luego verticalmente hacia abajo hasta el eje de las abscisas para registrar el valor de tiempo correspondiente. Este método es bastante arbitrario pero es ampliamente, si no universalmente utilizado. Se basa en la suposición de que la parte final de la curva que define la compresión secundaria del material es lineal como lo es la parte interior de la curva de consolidación primaria, de forma que la discontinuidad en la curva se presenta a D_{100} .

b. Para obtener D_0 (la lectura teórica del deformímetro en $t = 0$ ya que es imposible en un gráfico semilogarítmico localizar el punto para $t = 0$) en el gráfico semilogarítmico, si la parte inicial de la curva es parabólica, seleccionar un tiempo t_1 y un tiempo $t_2 = 4 t_1$. Medir la ordenada y , desde t_1 hasta t_2 sobre la curva y desplazar este mismo valor y , verticalmente encima de t_1 . Dibujar una línea horizontal sobre este punto y llamar el intercepto de esta línea con el eje de las lecturas de deformímetro D_0 (Fig. 13-6a). Resultados ligeramente más refinadas pueden obtenerse utilizando otros puntos a lo largo de la curva para t_1 y t_2 y determinar la línea horizontal a través del promedio de los valores obtenidos de esa forma. Si este valor de D_0 es considerablemente diferente de la lectura obtenida a t_0 (la cual supuestamente D_0 debe representar) o si la parte inicial de la curva no es parabólica, se debe utilizar la lectura real del deformímetro en $t = 0$ como D_0 . Con D_0 y D_{100} establecidas es posible obtener la lectura de deformímetro correspondiente al 50% de consolidación D_{50} como:

$$D_{50} = \frac{D_0 + D_{100}}{2} \quad (13-7)$$

c. Para hacer una gráfica de lectura del deformímetro contra $\sqrt{\text{tiempo}}$, se debe obtener el tiempo correspondiente a cada lectura del deformímetro; es decir, si $t = 25$ minutos, $\sqrt{\text{tiempo}} = \sqrt{25} = 5$, valor éste que debe dibujarse contra la correspondiente lectura de deformímetro para los 25 minutos. Esto debe hacerse para las restantes lecturas de tiempo y las correspondientes lecturas de deformímetro. Para encontrar D_0 , Taylor recomendó dibujar una línea recta a través de los primeros puntos dibujados (por ejemplo, 6 a 8) y extender esta línea hasta que intercepte el eje de la lectura de deformímetro, como se muestra en la Fig. 13-6b (línea A). Esta intersección con el eje de las ordenadas establece D_0 .

A continuación, tomar una abscisa cuyo valor sea 15% mayor que el valor obtenido al interceptar la continuación del tramo recto de la parte inicial de la curva de lectura de deformación contra \sqrt{t} tiempo y el eje del tiempo, y a partir del punto D_0 dibujar una línea recta que pase por este punto (como la línea B de la Fig. 13-6b). Continuar colocando sobre el gráfico los valores de la lectura de deformación contra \sqrt{t} tiempo y dibujar una curva suave utilizando un curvígrafo para la parte final de la gráfica. Cuando la curva dibujada cruce la línea B (la línea 1.15 desplazada), el valor de la ordenada se toma arbitrariamente como D_{90} . Es posible a continuación calcular D_{100} como:

$$D_{100} = D_0 - \frac{10}{q}(D_0 - D_{90}) \quad (13-8)$$

Con D_{100} conocido, puede obtenerse el valor de D_{50} utilizando la ec. (13-7).

- d. El valor de t_{50} o $\sqrt{\text{tiempo}_{50}}$ puede obtenerse a partir de la curva de lectura de deformación contra tiempo entrando con el valor D_{50} encontrado a partir de la ec. (13-7). Otros valores para D y sus correspondientes valores de tiempo pueden encontrarse de una forma similar para cada curva (para cada incremento de carga). La única razón para encontrar D_0 es la de determinar el valor de tiempo para varios porcentajes de consolidación (a menudo se utiliza el símbolo U).

El tiempo para el 50% de la consolidación, t_{50} (usualmente) o cualquier otro tiempo podrá utilizarse para encontrar el *coeficiente de consolidación* c_v :

$$c_r = \frac{TH^2}{t} \quad (13-9)$$

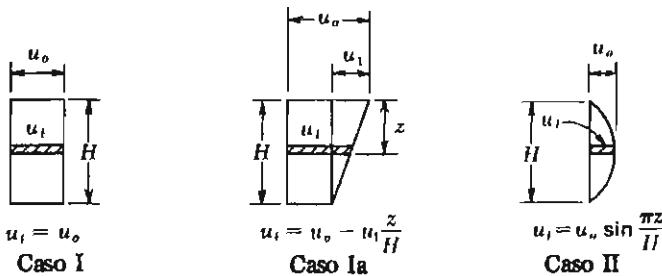
donde T = factor de tiempo (0.197 para $U = 50\%$), dado en la Tabla 13-1 para dos casos de presión de poros.

t = tiempo para el correspondiente factor de tiempo T (si $T = 0.197$, utilizar el tiempo transcurrido correspondiente a $t = t_{50}$)

H = longitud promedio para el máximo camino de drenaje durante el incremento de carga dado (y la muestra es doblemente drenada, H será igual a la mitad de la altura promedio de la muestra durante la aplicación del incremento de carga dado).

Tabla 13.1 Factores de tiempo para las distribuidores de presión indicadas

$U(\%)$	Caso I	Caso II
0	0.000	0.000
10	0.008	0.048
20	0.081	0.090
30	0.071	0.115
40	0.126	0.207
50	0.197	0.281
60	0.287	0.371
70	0.403	0.488
80	0.567	0.652
90	0.848	0.933
100		



La distribución de presión de poros para el caso I usualmente se supone para el caso Ia.

El coeficiente de consolidación se presenta usualmente en una gráfica como c_v contra logaritmo de la presión p , generalmente en la misma gráfica de relación de vacíos contra logaritmo de la presión a una diferente escala de ordenada (natural). Algunas personas la dibujan como un promedio para los incrementos de carga; sin embargo, la curva es usualmente muy errática debido a las limitaciones en la teoría, y debido al método de obtención de H en la ec. (13-9), parece razonable dibujar c_v contra el correspondiente incremento de carga tal como se muestra en la Fig. 13-9.

- e. La pendiente de la rama secundaria de la curva de asentamiento contra logaritmo del tiempo está relacionada con la fluencia o *consolidación secundaria*. Esta pendiente es aproximadamente constante para un suelo dado y este hecho se puede considerar para obtener D_{100} para incrementos de carga cuya aplicación se suspendió mientras la muestra se encontraba solamente al final de la consolidación primaria. La pendiente de la rama secundaria de la curva puede utilizarse para calcular el coeficiente de compresión secundaria C_α para estimativos de compresión secundaria como: (ver Fig. 13-6a).

$$C_\alpha = \frac{\Delta H}{\log t_2/t_1} \quad (13-10)$$

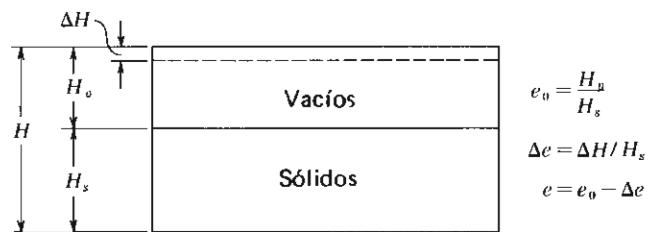
3. Es posible hacer relaciones graficadas entre:

Relación de vacíos contra presión

Deformación unitaria contra presión

- a. *Gráfica de la relación de vacíos e contra la presión*. Esta gráfica puede hacerse bien utilizando el logaritmo de la presión (Fig. 13-9) o bien como una representación aritmética (Fig. 13-8).

Figura 13-4
Relaciones entre el cambio en relación de vacíos y la altura.



De la Fig. 13-4 es evidente que mientras el esqueleto del suelo se deforma, como resultado de una disminución de los vacíos, la cantidad total de sólidos permanece constante. Por consiguiente, la relación de vacíos inicial, e_i , es:

$$e_i = \frac{H_v A}{H_s A} = \frac{H_v}{H_s}$$

En cualquier otro incremento de carga, la relación instantánea de vacíos e es:

$$e = \frac{(H_v - \Delta H)A}{H_s A} = e_i - \frac{\Delta H}{H_s}$$

ó $e = e_i - \Delta e$

El cambio de altura ΔH se obtiene a partir de las lecturas de deformímetro para cada incremento de carga; así, el cambio en relación de vacíos se puede calcular fácilmente.

De una gráfica aritmética de e contra presión es posible obtener el *coeficiente de compresibilidad* a_v como (Fig. 13-8):

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad (\text{usualmente se desprecia el signo negativo}) \quad (13-11)$$

y el *coeficiente de compresibilidad volumétrica* m_v como:

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (13-12)$$

Nótese que la unidad de m_v es recíproco del módulo de elasticidad y la inspección de a_v y m_v indican que si se interpretan:

$$\frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{\Delta L}{L} = \epsilon \quad (\text{deformación unitaria})$$

y p = presión

$$E = \frac{\Delta p}{\epsilon} \quad \text{o} \quad \frac{1}{E} = \frac{\epsilon}{\Delta p} = m_r$$

De la gráfica semilog (el método más común de representación de los datos) de la relación de vacíos contra log presión (como en la Fig. 13-9), se obtiene de la parte recta el *índice de compresión* C_c como:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log p_2/p_1} \quad (\text{despreciar el signo negativo}) \quad (13-13)$$

y de la rama de descarga de la curva se obtiene el *índice de expansión* C_s como:

$$C_s = \frac{\Delta e_s}{\log p_2/p_1} \quad (13-14)$$

El *índice de recompresión* C_r se obtiene de la rama de recompresión como:

$$C_r = \frac{\Delta e_s}{\log p_2/p_1} \quad (13-15)$$

Nótese que en las tres ecuaciones si la pendiente se extiende sobre un ciclo del papel logarítmico, la relación $\log p_2/p_1 = \log 10 = 1$ y por consiguiente solo es necesario obtener el valor de Δe para un ciclo de la gráfica como valor numérico del coeficiente.

b. *Gráfica de la deformación unitaria e contra log presión*. Este método de presentar la información es relativamente reciente y tiene la ventaja particular de dibujar la información a medida que el ensayo avanza. El gráfico típico se muestra en la Fig. 13-10 y es idéntico en forma a la curva e contra log p de la Fig. 13-9. La pendiente de la parte recta de la curva se denomina *relación de compresión* C'_c y se define como:

$$C'_c = \frac{\Delta e}{\log p_2/p_1} \quad (13-16)$$

La pendiente de la rama de recompresión puede llamarse *relación de recompresión* C'_r , y la pendiente de la rama de expansión puede llamarse *relación de expansión* C'_s con valores análogos a C_r y C_s .

4. En general, utilizar las lecturas inicial y final del deformímetro en cada incremento de carga para calcular o la deformación unitaria o el cambio en relación de vacíos. Utilizar D_0 y D_{100} para obtener t_{s0} para los cálculos del coeficiente de consolidación.
5. Cuando la curva de relación de vacíos contra log presión o de deformación unitaria contra log presión se ha dibujado, se encontrará que si el ensayo fue hecho sobre una muestra inalterada traída del terreno, tendrá una curva característica como la del punto 0 de la Fig. 13-10. Esta forma característica se atribuye a la descarga de la muestra de su presión geostática o sobre carga natural debido al peso propio cuando se le remueve del terreno. Esta conclusión se ha obtenido al observar la forma similar de la curva en procesos de descompresión y recompresión de muestras durante el ensayo de consolidación en el laboratorio tal como se ilustra en la Fig. 13-9.

De esta observación, Casagrande (1936) propuso que la presión de preconsolidación podría estimarse como sigue (ver Fig. 13-9):

- a. En el punto de mayor curvatura, estimado al ojo, dibujar una tangente a la curva.
- b. Por este punto de tangencia, dibujar una línea horizontal tal como la línea $O-C$ de la Fig. 13-10.
- c. Bisectar el ángulo formado en los pasos a y b anteriores.
- d. Extender la parte recta de la línea e contra log p (ϵ contra log p) hasta que intercepte la línea bisectriz del ángulo.

- e. Trazar una línea vertical hasta el eje de las abscisas, y leer el valor de la presión p correspondiente. Si $p = p_c$, la presión geostática calculada, el suelo se encuentra *normalmente consolidado*. Si $p > p_c$, el suelo está *preconsolidado* y este valor de p debería identificarse como p_c , o sea la presión de consolidación.
- f. Sobre la curva e -log p puede estimarse la relación de vacío in-situ e_0 como:
- (1) Suelo normalmente consolidado: sobre la curva e -log p en p_0 .
 - (2) Suelo preconsolidado: en la intersección de las líneas que definen p_c (como el punto B de la Fig. 13-10 utilizada para ilustración de la localización) como se muestra en la Fig. 13-9. Nótese cuidadosamente que el valor de la relación de vacíos inicial de la muestra del experimento e_i es generalmente mayor que la relación de vacíos in-situ e_0 aunque en la mayoría de la literatura no existe una distinción clara entre estos dos valores.

Procedimiento *Esta es una práctica de clase*

1. Moldee cuidadosamente una muestra dentro de un anillo de consolidación (use la muestra dada por el instructor).¹

Opcional: De la raspadura obtenida en el proceso de moldeo tomar una muestra representativa y utilizarla para determinación del contenido de humedad. Determinar la gravedad específica G_s .

Pesar la muestra y determinar la altura H , y el diámetro de la muestra. *Nota:* después de moldear la muestra a las dimensiones nominales (y/o utilizar el disco espaciador), registrar su espesor con una precisión de 0.01 mm (0.0001"), es decir, 20.00 mm (0.8000") u otra dimensión.

2. Colocar cuidadosamente la muestra de suelo en el consolidómetro con una piedra porosa *saturada* colocada sobre cada cara. Asegurarse de que las piedras porosas entren en el anillo de forma que el ensayo pueda avanzar satisfactoriamente.

Colocar el consolidómetro en el aparato de carga y ajustar el deformímetro de carátula; recordar que debe permitirse una posible compresión de la muestra de 4 a 12 mm.

Aplicar una carga de inicialización de 5 (para suelos blandos), a 10 (para suelos firmes) kPa. Verificar nuevamente que las piedras porosas no se apoyen sobre el anillo. Colocar el deformímetro de carátula en 0 (dejar esta carga de inicialización sobre el suelo).

3. En el momento conveniente, aplicar el primer incremento de carga (carga adicional suficiente para desarrollar el primer incremento de carga) y simultáneamente tomar lecturas de deformación a tiempos transcurridos de

0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8, 15, 39, 60, 120 min, a continuación por ejemplo, 4, 8, 16, horas, etc.

y hasta que haya muy poco cambio en la curva (lectura de deformación contra log t).

En laboratorios para estudiantes y si se utiliza una muestra de consolidación rápida, se puede modificar la secuencia de lecturas para cambiar las cargas a 30, 60 ó 90 min, o tan pronto como el gráfico de los datos indique que la muestra se encuentra dentro de la rama secundaria de su curva de consolidación.

4. Despues de 24 horas o como se haya establecido, o cuando el ΔH entre dos lecturas sea suficientemente pequeño, cambiar la carga al siguiente valor y nuevamente tomar lecturas a intervalos de tiempo controlados como en el paso 3 anterior.

Si se utiliza el experimento de laboratorio "rápido" en el tercero y cuarto incremento de carga, tomar suficiente tiempo en lecturas para establecer una pendiente adecuada para la consolidación secundaria que puede ser utilizada en los otros incrementos.

¹ El autor recomienda preparar una muestra de arena fina limosa, la cual se consolidará entre 30 minutos y una hora de manera que el ensayo puede ser hecho durante un día. La muestra no tendrá una presión de preconsolidación, pero todos los demás aspectos del ensayo de consolidación podrán ser apreciados. Los cursos avanzados pueden hacer el ensayo en una forma real.

5. Continuar cambiando cargas tomando lecturas de deformación contra tiempo discurrido a través de todo el rango de cargas del consolidómetro (o hasta que arbitrariamente se determine).
6. Colocar la muestra (incluyendo todas las partículas que se hayan expandido fuera del anillo) en el horno al final del experimento para encontrar el peso de los sólidos W_s y lograr el cálculo del volumen final de agua V_{wf} . Comparar W_s con el valor calculado en el paso 1 (si se hizo la determinación del contenido de humedad).
7. Dibujar las curvas de lectura de deformación contra log tiempo. Encontrar D_0 , D_{100} y D_{50} y los correspondientes t_{50} para cada incremento de carga y mostrar los valores sobre todas las curvas. Dibujar en papel semilogarítmico de cinco ciclos más de un incremento de carga en cada hoja, cuidándose de no sobrecargar excesivamente la gráfica. Referirse a las Figs. 13-5 a 13-10 para los cálculos y el método de presentar la información.
8. *Opcional:* Dibujar la curva de lectura del deformímetro contra $\sqrt{\text{tiempo}}$ para dos incrementos de carga cualesquiera y encontrar D_0 , D_{100} , D_{50} y el correspondiente t_{50} . Comparar t_{50} con el obtenido en el paso 7 y hacer los comentarios que considere apropiados en el informe si hay una gran discrepancia.
9. Utilizando los formatos para lecturas de deformación contra tiempo, los cálculos para e_0 , H_s , completar el formato titulado "Hoja de cálculos para e y c_v " (referirse a la Fig. 13-7).
10. Dibujar bien a , b o ambos según lo decida el instructor.
 - a. Calcular la deformación unitaria para cada incremento de carga como:

$$\epsilon = \frac{\Sigma \Delta H}{H_i}$$

donde $\Sigma \Delta H$ es la deformación acumulada a través de cualquier incremento de carga. Dibujar la deformación unitaria contra $\log P$ y obtener la relación de compresión C'_c , y calcular el índice de compresión como:

$$C_c = C'_c(1 + e_0)$$

y mostrar ambos valores sobre el gráfico e contra $\log P$.

- b. Calcular e_0 , e_i y hacer la gráfica de e contra $\log P$ y calcular el índice de compresión, C_c . Mostrar este cálculo sobre la gráfica junto con la forma de obtención de los valores para el cálculo (coordenadas de la curva).
11. Sobre la curva del paso 10, seleccionar una buena escala de ordenadas y dibujar c_v contra $\log P$ utilizando la parte derecha de la hoja del gráfico para definir la escala de c_v . No utilizar una escala demasiado grande de forma que se disminuya la importancia de la curva e (o ϵ) contra $\log P$. Asegurarse de utilizar una escala que indique razonablemente $c_v = \text{constante}$ (lo cual es una suposición esencial en la teoría de consolidación).
12. De la curva e (o ϵ) contra $\log P$ encontrar la presión de consolidación (si es aplicable).
13. Demostrar que $C'_c = \frac{C_c}{1 + e_0}$.

EXPERIMENTO DE CONSOLIDACION

Formato 14

Proyecto DATOS PARA EL MANUAL DE LAB. Trabajo No.

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. Muestra No.

Descripción del Suelo ARCILLA AZUL CON ARENA MUY FINA Profundidad de la Muestra

Realizado por J. E. B. Fecha de la práctica 11/23-29/76

Consolidómetro Tipo ANILLO FLOTANTE Anillo No. 51-1

Relación de amplificación del sistema de Carga 27:1 (TIPO HIDRAULICO)

Dimensiones del anillo: Diámetros: Diam. 62.14 mm Área, A 30.33 cm² Altura 24 mmAltura inicial del Suelo, H_i 20.00 mmGravedad específica del suelo, G_s =

Peso del anillo + muestra al comienzo del experimento = 292.02 g

Peso del anillo = 164.90

Peso del suelo húmedo, W_t = 127.12Peso de suelo seco calculado, W'_s = ~Peso de suelo seco al horno, w_s = 99.70 gAltura de sólidos calculada^b, H_s $[2(30.33) - (0.364 \times 30.33 + 16.75)] / 30.33 = 1.084 \text{ cm}$ Altura inicial de vacíos, $H_v = H_i - H_s$ = 2.000 - 1.084 = 0.916 cmGrado de saturación inicial, $S_i = (W_t - W_s) / (H_v A) = (127.12 - 99.70) / [0.916 \times 30.33] = 0.987$ Relación de vacíos inicial, $e_i = H_v / H_s = 0.916 / 1.084 = 0.845$

Datos finales del experimento (obtenidos al final del experimento)

Lectura inicial del deformímetro 0.00

Lectura final del deformímetro $364 \times 0.01 = 3.64 \text{ mm}$

Cambio en altura de la muestra 0.364 cm

Altura final de vacíos, $H_{vf} = \frac{16.75}{30.33} = 0.552 \text{ cm}$ Relación de vacíos final, $e_f = H_{vf} / H_s = 0.552 / 1.084 = 0.509$

Determinación del Contenido de Humedad	
Peso de lata + suelo húmedo	= ~
Peso de lata + suelo seco	= ~
Peso de la lata	= ~
Peso del agua	= ~
Peso del suelo seco	= ~
Contenido de humedad inicial, w_s	= ~

Determinación del Contenido de Humedad Final	
Peso final de anillo + suelo húmedo ^c	281.35 g
Peso final de anillo + suelo seco	264.60
Peso de suelo seco al horno, W_s	164.90
Contenido de humedad final, W_f	99.70 g
Grado de saturación final, S	$\frac{16.75}{99.70} \times 100 = 16.8\%$
	100 (assumed) %

^aObtenido de los datos finales sobre contenido de humedad^bUsar G_s o los datos finales de contenido de humedad para $S = 100\%$ ^cAsegurarse de incluir cualquier cantidad de suelo que se haya podido extruir del anillo al consolidómetro.

Figura 13-5

Datos del ensayo de consolidación.

(a) Datos preliminares del ensayo de consolidómetro.

EXPERIMENTO DE CONSOLIDACION (Datos de Compresión-Tiempo)

Formato 15

Proyecto DATOS PARA EL MANUAL DE LAB. Trabajo No. ~

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~

Descripción del Suelo ARCILLA AZUL CON ARENA MUY FINA Profundidad de la Muestra ~

Realizado por K. M. & M.C. Fecha de la práctica NOV. 23-29/76

Datos del Ensayo de Carga

Carga 100 kPa

Carga 200 kPa

Fecha de aplicación 11/25/76

Fecha de aplicación 11/26/76

Aplicada por K.M.

Aplicada por M.C.

Fecha y hora en el reloj	Tiempo transcurrido min.	Lecturas del deformímetro $\times 10^{-2} \text{ mm/div}$	
		Original	Ajustado
11-25 8:27	0	59	0.59 mm
	0.1	66	
	0.25	67.5	
	0.5	69.5	
	1	70	
	2	72	
	4	73	
	8	75	
	15	78	
	30	80	
	60	83.5	
10:27	120	88.5	
12:43	256	94.0	
3:27	420	97	
11-26 8:04	1417	98	0.98 mm

Fecha y hora en el reloj	Tiempo transcurrido min.	Lecturas del deformímetro $\times 10^{-2} \text{ mm/div}$	
		Original	Ajustado
11-26 8:04	0	98	
	0.1	109.5	0.11 mm
	0.25	112	
	0.5	113.5	
	1	116	
	2	117.5	
	4	120	
	8	123.5	
	15	127	
	30	132.5	
	60	138	
10:04	120	143.5	
12:00	256	148	
5:43	579	151	
11-27 7:34	1410	152	1.52 mm

*Poner aquí las subdivisiones del deformímetro, 0.01 mm/div., etc.

(b) Datos para dibujar la curva de lectura del deformímetro vs. tiempo mostrada en la Fig. 13-6.

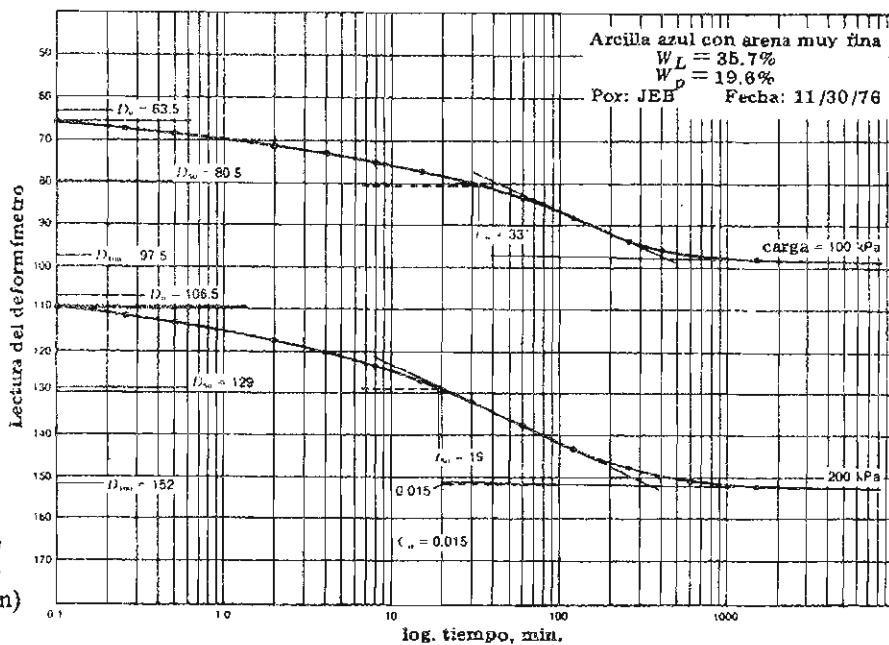
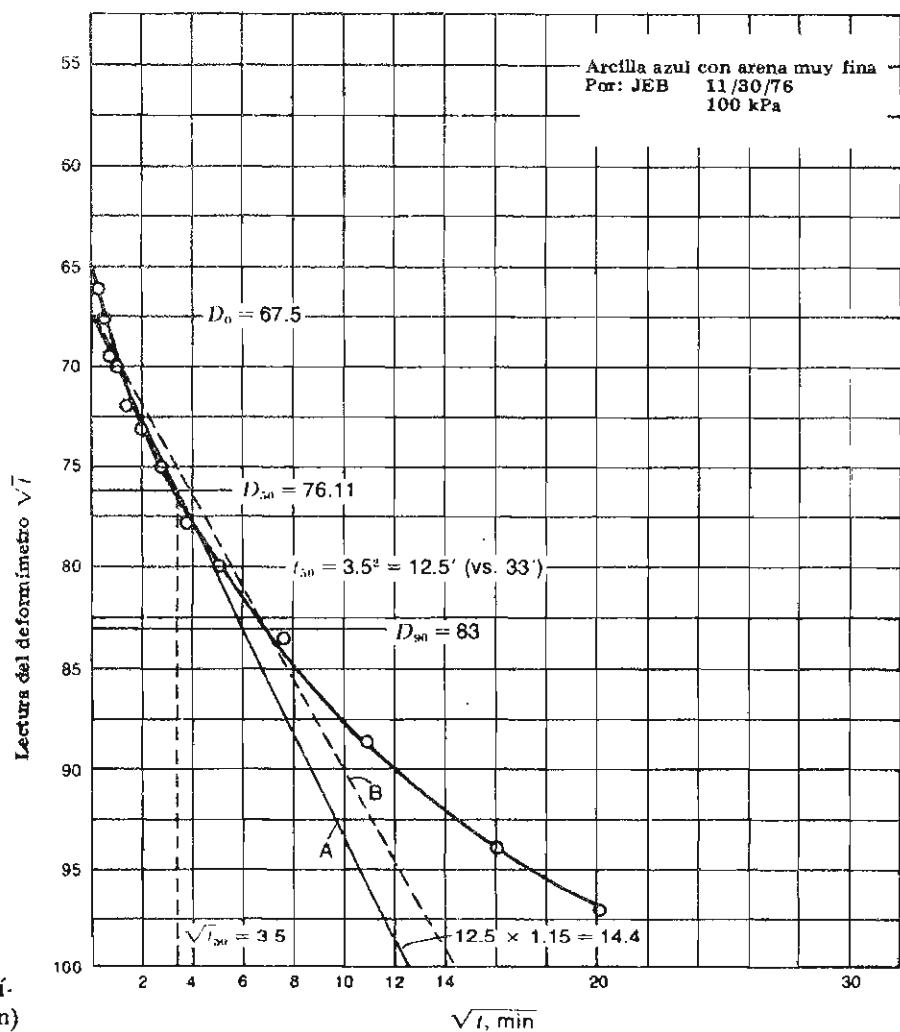


Figura 13-6
Curvas de lectura del deformómetro vs. tiempo
 (a) Lectura del deformómetro vs. log tiempo (min)



(b) Lectura del deformómetro vs. \sqrt{t} (min)

Memoria de Cálculos

De la línea 2 de la Fig. 13-9 (carga = 25 kPa)

Lectura inicial del deformímetro = 0.00 cm

Lectura final del deformímetro = 0.032 cm ($32 \times 0.01 \times 0.1$)

$$\Delta H = 0.032 \text{ cm}$$

$$\Delta e = \frac{H}{H_i} = \frac{0.032}{1.084} = 0.0296 \rightarrow 0.030 \text{ (exactitud de la gráfica)}$$

$$e = e_i - \Delta e = 0.845 - 0.030 = 0.815$$

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_i} = \frac{0.032}{2.00} = 1.6 \times 10^{-2}$$

$$\text{Altura promedio} = H_i - \frac{(\Delta H_{i-1} + \Delta H_i)}{2}$$

$$= 2.00 - \frac{0.00 + 0.032}{2} = 1.984 \text{ cm}$$

$$c_r = \frac{0.197 H^2}{t_{50}} = \frac{0.197(1.984/2)^2}{10.0} = 0.0194 \text{ cm}^2/\text{min} \text{ (drenaje en dos sentidos)}$$

De la línea 4 (carga = 100 kPa)

Lectura inicial del deformímetro

Lectura final del deformímetro = 59 = 0.059 cm

$$= 98 = 0.098 \text{ cm}$$

$$\Delta H = 0.098 \text{ cm}$$

$$\Delta e = \frac{0.098}{1.084} = 0.090$$

$$e = 0.845 - 0.090 = 0.755$$

$$\epsilon = \frac{0.098}{2.00} = 4.9 \times 10^{-2}$$

$$\text{Altura promedio} = 2.00 - \frac{0.059 + 0.098}{2} = 1.922 \text{ cm}$$

$$c_r = \frac{0.197(1.922/2)^2}{33.0} = 0.0055 \text{ cm}^2/\text{min}$$

EXPERIMENTO DE CONSOLIDACION (Hoja de cálculos para e y c_v)

Formato 16

Proyecto DATOS PARA EL MANUAL DE LAB.Trabajo No. Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEYPerforación No. Muestra No. Descripción del Suelo ARCILLA AZUL CON ARENA MUY FINA Profundidad de la Muestra Realizado por _____ Fecha de la práctica 11/30/76*Datos de la muestra*

$$\text{Vol. inicial de la muestra, } V_i = 60.66 \text{ cm}^3 \quad \text{Peso seco de sólidos del suelo, } W_s = 99.70 \text{ g}$$

$$\text{Gravedad específica del Suelo, } G_s = 3.03 \text{ (Comp.)} \quad \text{Altura de Sólidos, } H_s = 1.084 \text{ cm}$$

$$\text{Relación de vacíos inicial, } e_i = 0.845$$

$$\text{Altura inicial de vacíos, } H_v = 0.916$$

Incremento de carga	Lectura del deformímetro al final del incremento (____)	Cambio en la altura de la muestra, ΔH (cm)	$\epsilon = \Delta H/H$, $e = \Delta H/H_i$	Relación de vacíos instantánea e	Altura promedio ^c para el incremento de carga (cm)	H_d (cm)	Tiempo ^e para el 50% de consolidación t_{50} , min.	Coeficiente de consolidación, c_p (cm^2/min)
0	0	0		0.845	-	-	-	-
25 kPa	32	0.032	1.6^* 0.030	0.815	1.984	0.992	10'	0.0194
50	59	0.059	3.0^* 0.054	0.791	1.954	0.977	22	0.0089
100	98	0.098	4.9^* 0.090	0.755	1.922	0.961	33	0.0055
200	152	0.152	7.6^* 0.140	0.705	1.875	0.938	19	0.0091
400	223	0.223	11.2^* 0.206	0.639	1.812	0.906	15	0.0108
800	296	0.296	14.8^* 0.273	0.592	1.741	0.871	14	0.0107
1600	364	0.364	18.2^* 0.335	0.510 ^f	1.670	0.835	7.4'	0.0186
PAG. 128								
$* \epsilon \times 10^{-2}$								
LOS DATOS DE REBOTE Y RECOMPRESIÓN (DIBUJADOS EN LA FIG. 13-9) NO SE MUESTRAN AQUÍ								
E VS LOG. P - DIBUJADA EN LA FIG. 13-10								

Nota: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

^aLectura final del incremento anterior = lectura inicial del incremento siguiente.^bUsar deformación unitaria o relación de vacío (o ambos)^cAltura promedio del incremento = Altura inicial - $\frac{1}{2} \Delta H$ ^dH = longitud del camino máximo de drenaje; para anillo flotante = $\frac{1}{2}$ altura promedio para el incremento dado^eDe la curva de deformación vs. log t

Figura 13-7

Cálculos típicos usando un formato de resumen de cálculos. Estos cálculos se usan para hacer las gráficas de e vs. p , e vs. $\log p$, y c_v vs. $\log p$. Los datos originales incluyeron un experimento de descarga-recarga para calcular la relación de vacíos de 0.497 mostrada en la Fig. 13-9. Los datos se han editado especialmente para fines ilustrativos de forma que muestren desde la primera carga hasta 1600 kPa.

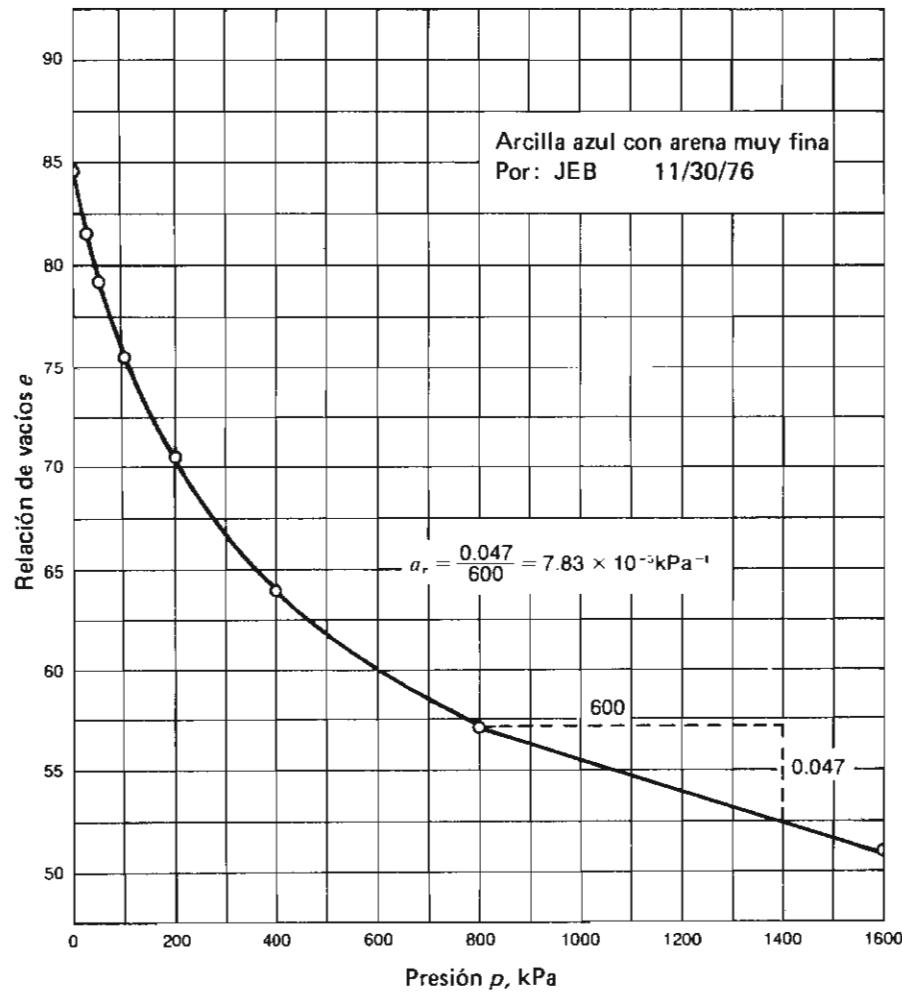


Figura 13-8
Gráfica de e vs. p (kPa) de los datos de la Fig. 13-7

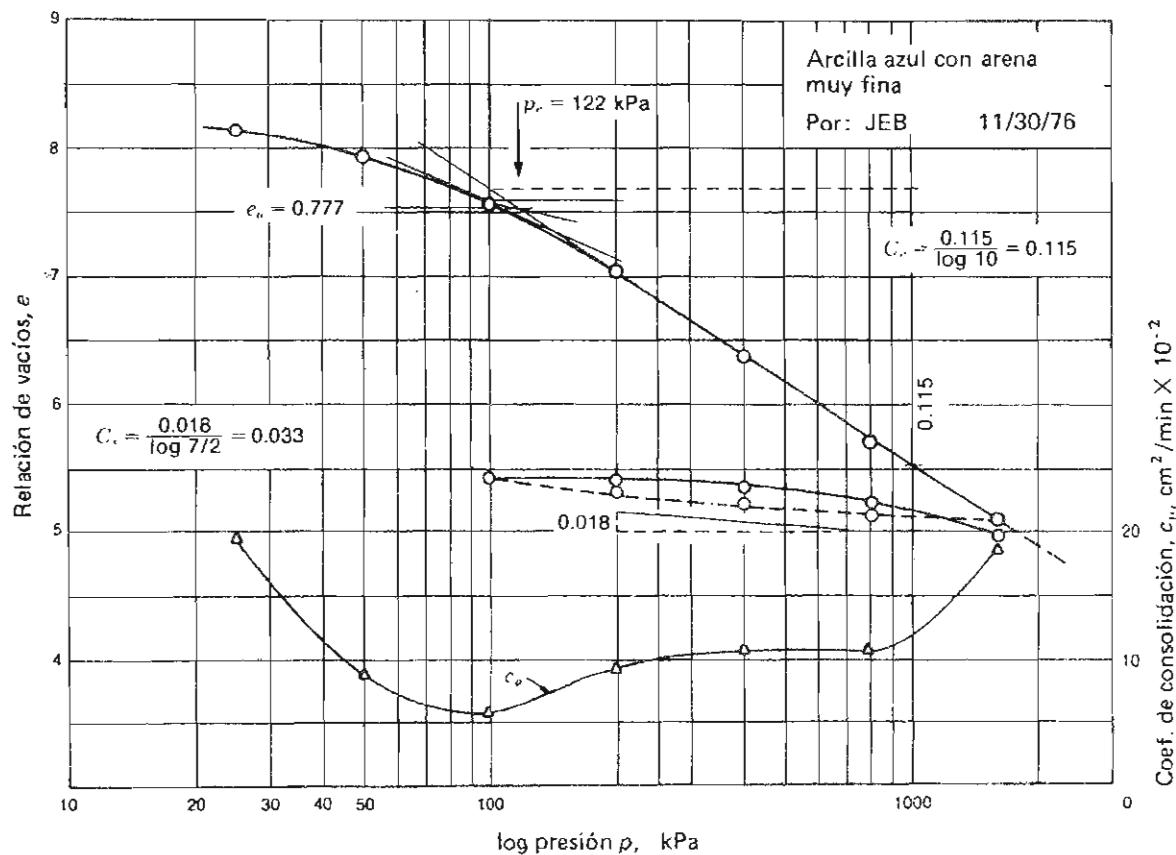


Figura 13-9

Gráfica de e vs. $\log p$ y c_v vs. $\log p$ usando los datos de la Fig. 13-7.

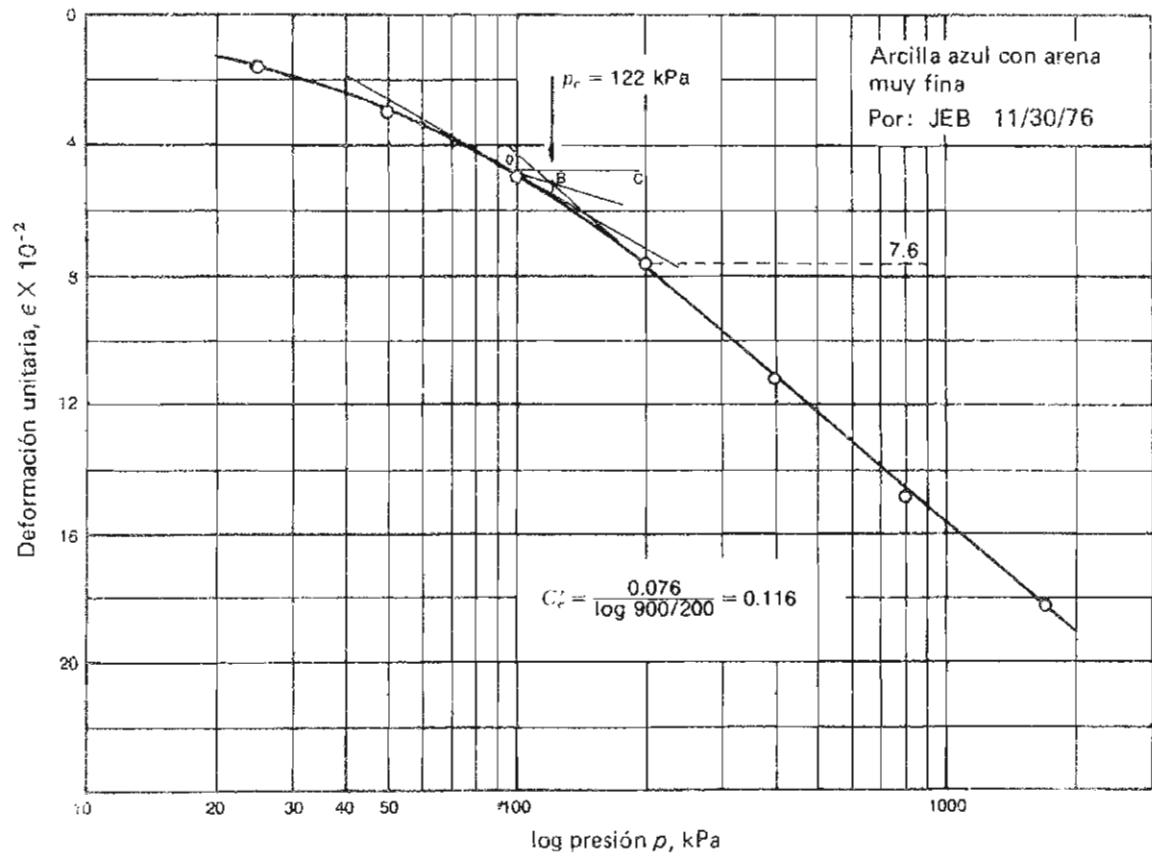


Figura 13-10
Gráfica de la deformación unitaria ϵ vs. $\log p$ usando los datos de la Fig. 13-7

Experimento N° 14

EXPERIMENTO DE COMPRESIÓN INCONFINADA

Referencias

AASHTO T208-70
ASTM 2166-66

Objetivo

Introducir al estudiante a un procedimiento aproximado para evaluar la resistencia al corte de suelos cohesivos.

Equipo

Máquina de compresión inconfinada (cualquier tipo de máquina de compresión que tenga un sistema de lectura de carga de rango suficientemente bajo para obtener lecturas de carga aproximada).

Deformímetro de carátula (lectura con precisión de 0.01 mm/división).

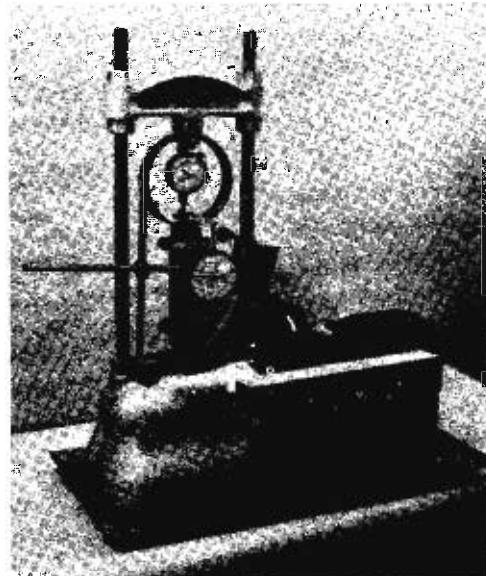


Figura 14-1

Máquina de compresión inconfinada. Puede ser de operación manual o motorizada, como se muestra. El sistema CBR de la Fig. 19-3 o similar puede también utilizarse para hacer el experimento de compresión inconfinada.

Exposición General

Cuando se introdujo por primera vez el método de ensayar muestras de suelo cohesivo recuperadas con tubos del campo en compresión simple, fue aceptado ampliamente como un medio para determinar rápidamente la resistencia al corte de un suelo. Utilizando la construcción del círculo de Mohr, es evidente que la resistencia al corte o cohesión (símbolo c) de una muestra de suelo puede ser calculada aproximadamente como:

$$c = \frac{q_u}{2} \quad (14-1)$$

donde q_u se utiliza siempre como el símbolo para representar la resistencia a la compresión inconfinada del suelo. Este cálculo se basa en el hecho que el esfuerzo principal menor σ_3 es cero (atmosférico) y que el ángulo de fricción interna ϕ del suelo se supone cero. Esta condición $\phi = 0$ es la misma obtenida en el ensayo no consolidado no drenado del experimento No. 15 sobre un suelo saturado; así, para darle al experimento de compresión inconfinada más dignidad, se le llama a menudo "no drenado" o ensayo U. Cuando se tuvo más conocimiento sobre el comportamiento del suelo, se hizo evidente que el ensayo de compresión inconfinada generalmente no proporciona un valor bastante confiable de la resistencia al corte del suelo por al menos las siguientes tres razones:

1. El efecto de la restricción lateral provista por la masa de suelo sobre la muestra se pierde cuando la muestra es removida del terreno. Existe sin embargo la opinión de que la humedad del suelo le provee un efecto de tensión superficial (o confinamiento) de forma que la muestra está algo "confinada". Este efecto debería ser más pronunciado si la muestra está saturada o cercana a ella. Este efecto dependerá también de la humedad relativa del área del experimento, lo cual hace su evaluación cuantitativa más difícil.
2. La condición interna del suelo (grado de saturación, presión del agua de los poros bajo esfuerzos de deformación, y efectos de alteración del grado de saturación) no pueden controlarse.
3. La fricción en los extremos de la muestra producida por las placas de carga origina una restricción lateral sobre los extremos que altera los esfuerzos internos en una cantidad desconocida.

Los errores producidos por los dos primeros factores citados arriba pueden eliminarse o por lo menos reducirse utilizando los experimentos de compresión confinados (*o triaxiales*) del experimento siguiente. El tercer aspecto ha sido objeto de considerable investigación, y actualmente se piensa que este factor no es tan importante como podría a primera vista suponerse. Es posible fabricar platinas especiales de apoyo para reducir los efectos de fricción si se desean resultados experimentales muy refinados.

El ensayo de compresión inconfinada se utiliza ampliamente porque constituye un método rápido y económico de obtener aproximadamente la resistencia al corte de un suelo cohesivo. De paso, debería destacarse que mientras los resultados del experimento de compresión inconfinada pueden tener poca confiabilidad, existen muy pocos métodos de ensayo que permitan resultados mucho mejores, a menos que se refinen considerablemente los procedimientos y esfuerzos del experimento (de los técnicos de laboratorio). Los resultados de resistencia al corte a partir de ensayos de compresión inconfinada son razonablemente confiables si se interpretan adecuadamente y se reconoce que el experimento tiene ciertas deficiencias. Por ejemplo, el uso de una curva de esfuerzo-deformación unitaria basada en el experimento de compresión inconfinada para obtener un módulo de elasticidad (más correciamente un módulo de deformación unitaria, ya que el suelo no es un material elástico para las deformaciones unitarias asociadas usualmente con este tipo de experimentos) dará, en general, un valor muy poco confiable.

El experimento de compresión inconfinada puede hacerse *con control de deformación unitaria* o *con control de esfuerzo*. El experimento de deformación unitaria controlada es casi universalmente utilizado, pues es una simple cuestión de acoplar una relación de engranaje adecuada a un motor y controlar la velocidad de avance de la plataforma de carga. Se ha encontrado que el ensayo es bastante sensible a la tasa de deformación unitaria, pero una tasa de deformación unitaria entre 0.5 y 2%/min (es decir, un espécimen de 50 mm a una tasa de deformación unitaria de 1% debería comprimirse a una velocidad de 0.50 mm/min), parece brindar resultados satisfactorios. Como las muestras del experimento de compresión inconfinada se exponen usualmente al aire seco del laboratorio (baja humedad), deberían llevarse a falla antes de 10 min; de otra forma, el cambio en el contenido de humedad podría afectar la resistencia a la compresión inconfinada (aumentarla, usualmente).

Un experimento de esfuerzo controlado requiere cambios en los incrementos de carga y puede causar una respuesta errática en deformaciones unitarias y/o la resistencia

última cayendo entre dos incrementos de esfuerzo. Las cargas se aplican a través de un aparato/yunque de carga muerta y la carga real se puede obtener por adición de agua a un recipiente o por almacenamiento de pesas en un soporte colgante. Ambos métodos producen "una carga de impacto" a la muestra, son difíciles de aplicar, y por estas varias razones, los experimentos de esfuerzo controlado se utilizan muy raramente en cualquier tipo de experimento de suelos.

Las muestras de suelos (y obviamente solo suelos ϕ - c , o cohesivos de $\phi = 0$ aparente pueden ensayarse de esta forma) se prueban hasta que la carga en la muestra comience a decrecer o hasta que por lo menos se haya desarrollado una deformación unitaria del 20% [para una muestra de 76 mm de longitud, un 20% de deformación unitaria implica un acortamiento axial total de 0.20 (76) = 15.2 mm].

Se efectúan los cálculos de esfuerzo y deformación unitaria axial de forma que se pueda dibujar una curva esfuerzo-deformación unitaria para obtener el máximo esfuerzo (a menos que ocurra primero el 20% de la deformación unitaria) que se toma como la resistencia a la compresión inconfinada q_u del suelo. La curva esfuerzo-deformación unitaria se dibuja para obtener un valor "promedio" de q_u mayor para tomar simplemente el valor máximo de esfuerzo de la hoja del formato de cálculo. La deformación unitaria ϵ se calcula de la mecánica de materiales como:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{mm/mm} \quad (14-2)$$

donde: ΔL = deformación total de la muestra (axial), mm
 L_0 = long. original de la muestra, en mm.

El esfuerzo instantáneo σ del ensayo sobre la muestra se calcula como:

$$\sigma = \frac{P}{A'} \quad (\text{kPa}) \quad (14-3)$$

donde: P' = carga sobre la muestra en cualquier instante para el correspondiente valor de ΔL , en kN.

A' = área de la sección transversal de la muestra para la carga correspondiente P , en m^2 .

En mecánica de suelos es práctica convencional corregir el área sobre la cual actúa la carga P . Esto no se hace cuando se ensayan metales en tensión. Una de las razones para esta corrección de área es la de permitir cierta tolerancia sobre la forma como el suelo es realmente cargado en el terreno. Aplicar esta corrección al área original de la muestra es algo conservativo también pues la resistencia última calculada de esta forma será menor que la que se podría calcular utilizando el área original. El área original A_0 se corrige considerando que el volumen total del suelo permanece constante. El volumen total inicial de la muestra es:

$$V_T = A_0 L_0 \quad (14-4)$$

pero después de algún cambio ΔL en la longitud de la muestra,

$$V_T = A' (L_0 - \Delta L) \quad (14-5)$$

Igualando las ecuaciones (14-4) y (14-5), cancelando términos y despejando el área corregida A' , se obtiene:

$$A' = \frac{A_0}{1 - \epsilon} \quad (14-6)$$

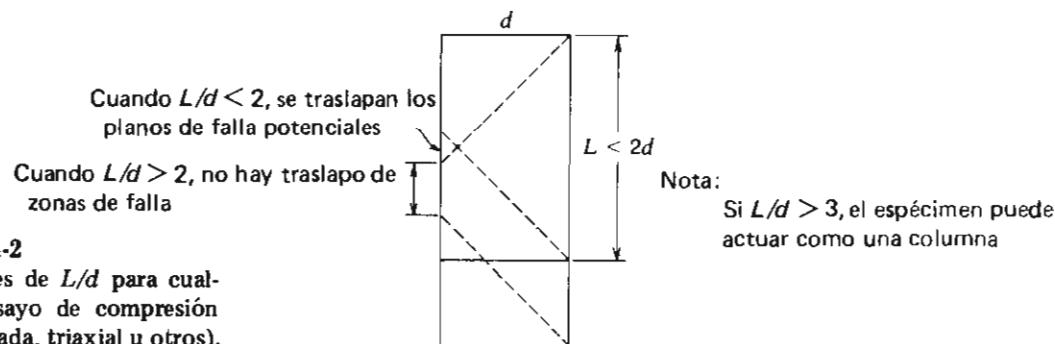


Figura 14-2

Relaciones de L/d para cualquier ensayo de compresión (inconfinada, triaxial u otros).

La relación longitud-diámetro de las muestras para el experimento debería ser suficientemente grande para evitar interferencias de planos potenciales de falla a 45° de la Fig. 14-2 y suficientemente corta para no obtener falla de "columna". La relación L/d que satisface estos criterios es

$$2 < L/d < 3$$

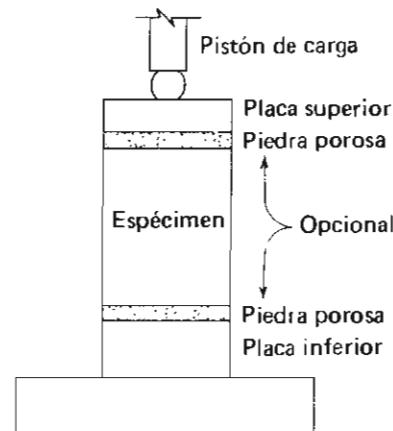


Figura 14-3

Esquema de un ensayo de compresión inconfinada.

La Fig. 14-3 da detalles esquemáticos de un ensayo de compresión inconfinada. En el ensayo se coloca una muestra de longitud adecuada entre dos placas (aparatos para transferir la carga al suelo), con piedras porosas insertadas como se muestra, a discreción del laboratorista. Se aplica una carga axial y a medida que la muestra se deforma crecientemente, se obtienen cargas correspondientes. Para una cantidad considerable de ensayos de terreno se llevan al terreno, aparatos portátiles de compresión, se ensayan las muestras a la falla, y se registran las cargas de "falla" y deformación. Estos datos se utilizan para calcular las fallas corregidas A' y la resistencia a la compresión inconfinada q_u sin dibujar la curva esfuerzo-deformación unitaria. El q_u obtenido de esta forma no difiere en mucho del método más preciso que a continuación se describe.

Procedimiento *Esta es una práctica de grupo*

1. Cada grupo debe preparar dos muestras de tubo con relación L/d entre dos y tres (o utilizar la muestra de laboratorio provista por el instructor).¹

¹ Es posible obtener muestras excelentes para el ensayo utilizando el aparato de compactación tipo Harvard miniatura. Si se varía el contenido de humedad entre los diferentes grupos de laboratorio, se puede simultáneamente obtener un estudio de la resistencia al corte contra el contenido de humedad y/o la densidad.

2. Colocar las muestras en recipientes húmedos o dejarlas en el cuarto de humedad para prevenir su desecamiento mientras se espera turno para la máquina de compresión. Calcular la deformación correspondiente al 20% de deformación unitaria para las muestras mientras se espera turno para la máquina, de forma que se pueda saber cuándo terminar el experimento si la muestra recibe carga sin mostrar un pico antes que dicha deformación unitaria suceda.

Calcular la densidad de las muestras y pesar dos latas de contenido de humedad de forma que se pueda determinar el contenido de humedad de la muestra después de terminar el experimento.

3. Alinear cuidadosamente la muestra en la máquina de compresión. Si los extremos no son perfectamente perpendiculares al eje del espécimen, la parte inicial de la curva de esfuerzo-deformación unitaria será plana (hasta que el área total de la muestra contribuya a la resistencia al esfuerzo, las deformaciones unitarias serán demasiado grandes para el esfuerzo calculado).

Establecer el cero en el equipo de carga (bien sea un deformímetro de carátula para registrar la deformación de un anillo de carga o un DVM si se utiliza una célula de carga electrónica) y establecer el cero en el deformímetro. En este momento es necesario aplicar una carga muy pequeña sobre la muestra (del orden de una unidad del deformímetro de carga, o quizás 0.5 kg para una celda de carga).

Prender la máquina y tomar lecturas en los deformímetros de carga y deformación como sigue (para un deformímetro de 0.01 mm/división):

10, 25, 50, 75, 100, y de aquí en adelante cada 50 a 100 divisiones del deformímetro, hasta que suceda uno de los siguientes:

- a. La carga sobre la muestra decrece significativamente
- b. La carga se mantiene constante por cuatro lecturas
- c. La deformación sobrepasa significativamente el 20% de la deformación unitaria.

Utilizar el formato para este experimento — no copiar los datos del papel de borrador (referirse a la Fig. 14-4). Utilizar cuantos formatos sean necesarios para cada ensayo. Determinar el contenido de humedad para cada muestra.

4. Calcular la deformación unitaria, el área corregida, y el esfuerzo unitario, para suficientes lecturas (unos 8 a 10 puntos bien espaciados) para definir la curva esfuerzo-deformación unitaria adecuadamente. Dibujar los resultados en una hoja de papel milimetrado (ambas curvas en la misma hoja); mostrar q_u como el esfuerzo pico en cada ensayo y mostrar el valor promedio de q_u para ambos ensayos. Asegurarse de dibujar la deformación unitaria como abscisa.
5. a. Dibujar el círculo de Mohr utilizando el q_u promedio y mostrar la cohesión del suelo.
Si no se dibuja con un compás el informe es inaceptable.
- b. Calcular la cohesión del suelo utilizando el círculo de Mohr de (a) y suponer que el suelo tiene un ángulo de fricción interna, $\phi = 10^\circ$. Discutir si q_u es conservativa o “no conservativa” bajo esta circunstancia.
- c. Calcular el módulo secante de elasticidad del suelo para 0.25, 0.5 y 0.75 q_u ; calcular también el módulo tangente inicial. Tabular estos valores en las “Conclusiones” del informe y discutir su significado. ¿Qué valor del módulo de esfuerzo-deformación unitaria recomienda para este suelo?
- d. Comentar sobre los efectos de la densidad y del contenido de humedad contra q_u .

**ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA
TIPO DE MUESTRA (INALTERADA, REMOLDEADA)**

Formato 17

Proyecto ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA Trabajo No. Localización del Proyecto LAB. SUELOS DE UNIV. DE BRADLEYDescripción del Suelo ARCILLA LIMOSA, PARDA W_a = 37,3% W_p = 19,8%Realizado por J.E.B. & K.M.Fecha de la práctica 12/7/76*Datos de la Muestra*

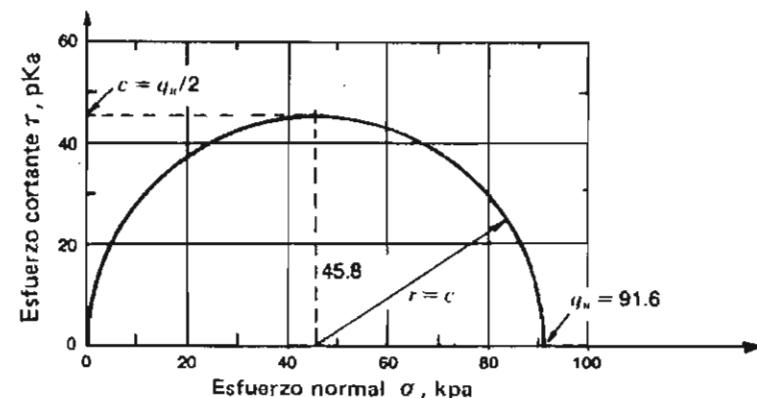
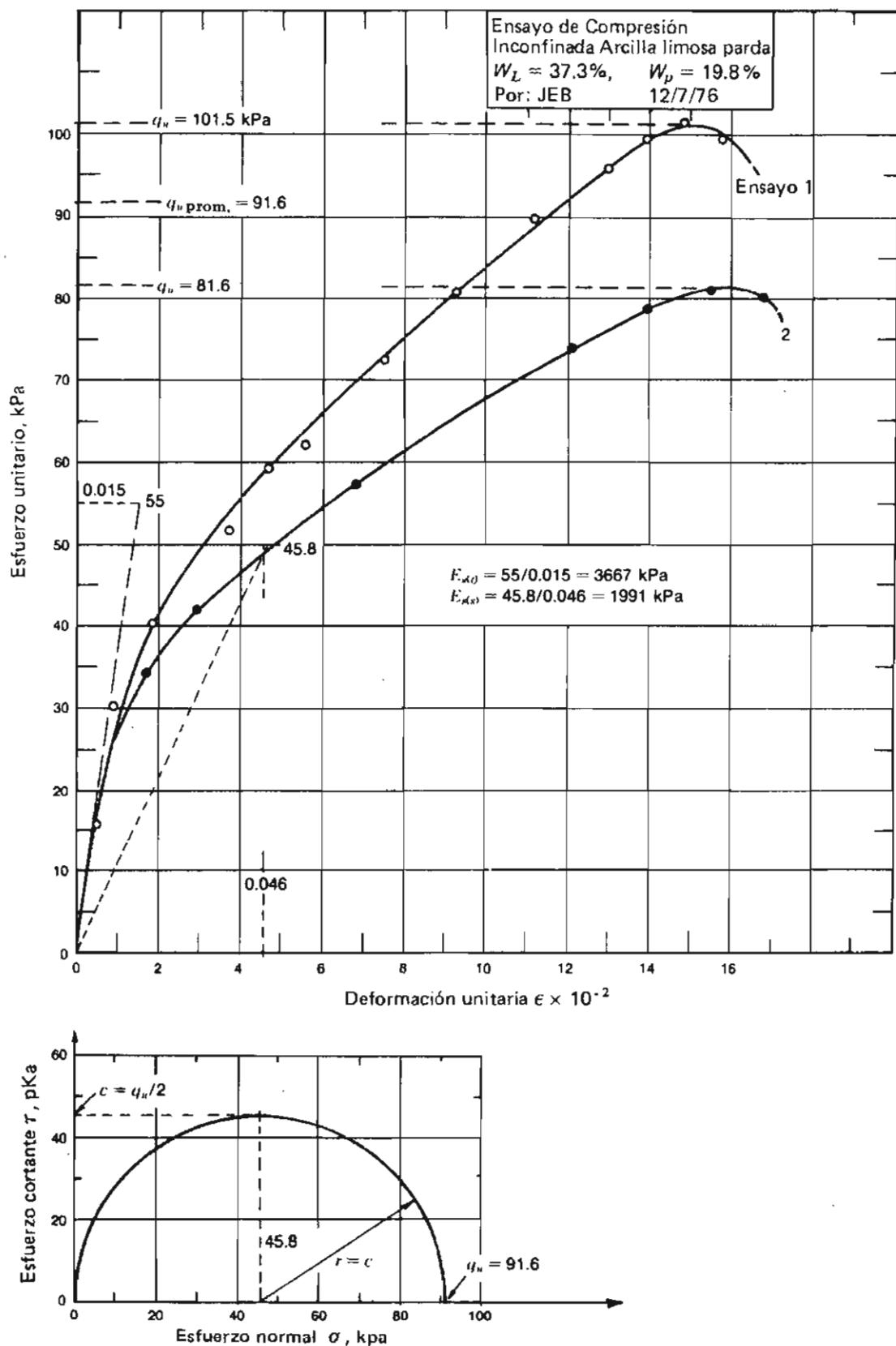
Diám. 45.5 mm Área A₀ 16.26 cm² Altura, L₀ 108 mm
 Vol. 175.61 cm³ Peso 379.5 g Peso unitario húmedo 2.16 g/cm³
 Contenido de humedad, ()
 w% 14.5 Peso unitario seco 1.89 g/cm³ LRC 0.34 kg/dm³

Lectura del deformímetro ($\times 10^{-2}$)	Deformímetro de carga (unidades)	Deformación de la muestra ΔL (mm)	Deformación unitaria $\Delta L/L_0 \times 10^{-2}$	Área CF 1- ϵ	Área corregida, A' (cm)	Carga total sobre la muestra (col 2 x LRC)	Esfuerzo sobre la muestra kPa
1	2	3	4	5	6	7	8
DATOS ALGO EDITADOS..... DIBUJADOS EN LA FIG. 14-5- ENSAYO #1	0	0	0	0	16.26	-	-
50	8	0.50	0.50	0.9950	16.34	2.72	16.3
100	15	1.00	0.90	0.9910	16.41	5.10	30.5
200	20	2.00	1.85	0.9815	16.57	6.80	40.2
400	29	4.00	3.70	0.9630	16.88	9.18	53.3
500	30	5.00	4.63	0.9537	17.05	10.20	58.7
600	33	6.00	5.56	0.9444	17.22	11.22	63.9
750	38	7.50	6.94	0.9306	17.47	12.92	72.5
1,000	44	10.00	9.26	0.9074	17.92	14.96	81.9
1,200	49	12.00	11.11	0.8889	18.29	16.66	89.3
1,400	54	14.00	12.96	0.8704	18.68	18.36	96.4
1,500	56	15.00	13.89	0.8611	18.88	19.04	98.90
1,600	58	16.00	14.81	0.8519	19.09	19.72	101.30
1,700	57	17.00	15.74	0.8426	19.30	19.38	98.48

Nota: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

Resistencia de la compresión inconfinada $q_u = 101.5 \text{ kPa}$ Cohesión = $q_u/2 = 50.8 \text{ kPa}$ Figura 14-4 $q_{u\text{prom}} = 91.6 \text{ kPa (2 ENSAYOS)}$

Datos de un ensayo de compresión inconfinada.



Experimento N° 15

ENSAYO TRIAXIAL—SIN MEDICION DE PRESION DE POROS

Referencias

AASHTO T234-70

ASTM D2850-70

ASTM (1949-50), Ensayos Triaxiales de Suelos y Mezclas Bitumunosas, *STP No. 106*.

ASCE (1960), Conferencia de Investigación Sobre Suelos Cohesivos, Boulder, Colorado, *Proceedings*.

Silver, M. L., y T. K. Park (1975), Efectos del Procedimiento del Ensayo en Comportamiento Dinámico del Suelo, *J. Geotechnical Div., ASCE, GT 10*, Octubre, pp. 1061-1083.

Objetivo

Introducir al estudiante al procedimiento básico para determinar los parámetros de suelos ϕ y c del suelo. Se incluyen métodos para suelos cohesivos y suelos no cohesivos.

Equipo

Máquina de compresión (deformación unitaria controlada)

Cámara triaxial (referirse a las Fig. 15-1 a 15-3)

Molde para la muestra, membrana de caucho, expansor de la membrana, bandas de caucho para ajustar la membrana, y piedras porosas.

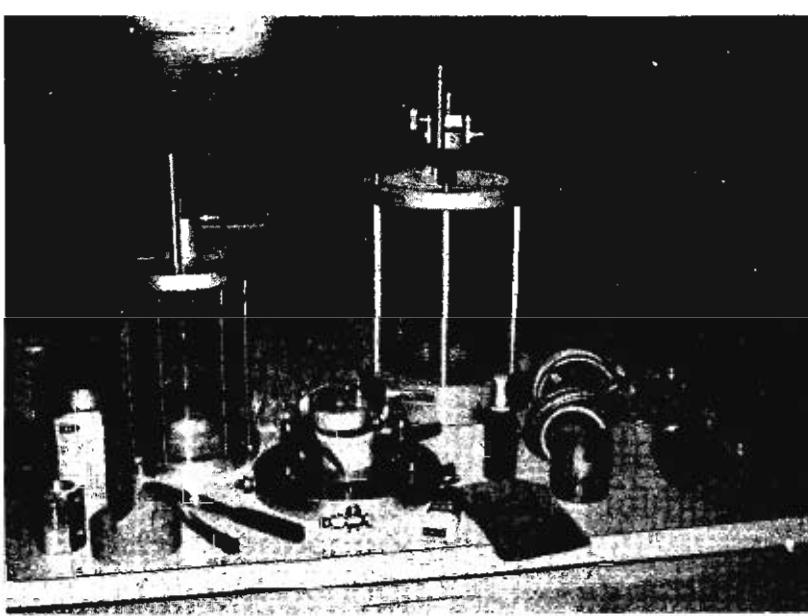
Bomba de vacío y fuente de presión de aire

Calibradores

Equipo para moldear la muestra a partir de muestras de tubo (opcional)

Figura 15-1

Cámaras triaxiales y equipo periférico. Se muestran dos tipos de cámaras triaxiales: la de tipo ajuste-rápido, se muestra desarmada, es preferida para la mayoría de trabajos que requieran presión máxima de cámara de alrededor de 5 kg/cm^2 . A la izquierda se aprecian dos camisas desarmables usadas para horizontalizar las superficies extremas en muestras de suelos cohesivos. A la derecha se ven dos aparatos expansores de membranas para suelos cohesivos o no-cohesivos. Se muestra también equipo misceláneo como espátulas, compactador de muestras, y sierras de moldeo.



Exposición General

Leer la "Exposición general" de los experimentos No. 14 y No. 16.

De una inspección del aparato triaxial (ver también Figs. 15-1 y 15-2), el estudiante debería ser capaz de concluir que este equipo puede permitir el establecimiento de cualquier estado en el fluido de los poros, desde un estado negativo (o vacío) hasta un estado completamente saturado con exceso de presión de poros en el fluido. Las condiciones *drenadas o no drenadas* se pueden investigar. Para un ensayo *drenado*, a medida que se aplica la carga al espécimen de suelo, se puede permitir que el fluido de los poros escape abriendo la válvula apropiada. Un ensayo *no drenado* puede hacerse cerrando el sistema de suelo a la atmósfera de forma que nada del fluido de los poros pueda escapar durante el ensayo. Para la mayoría de las personas el término *ensayo drenado* significa que la válvula adecuada se abre de forma que el fluido de los poros pueda escapar. Sin embargo, estrictamente hablando, un ensayo drenado es aquél en el cual se abre la válvula adecuada de drenaje del fluido de los poros y la

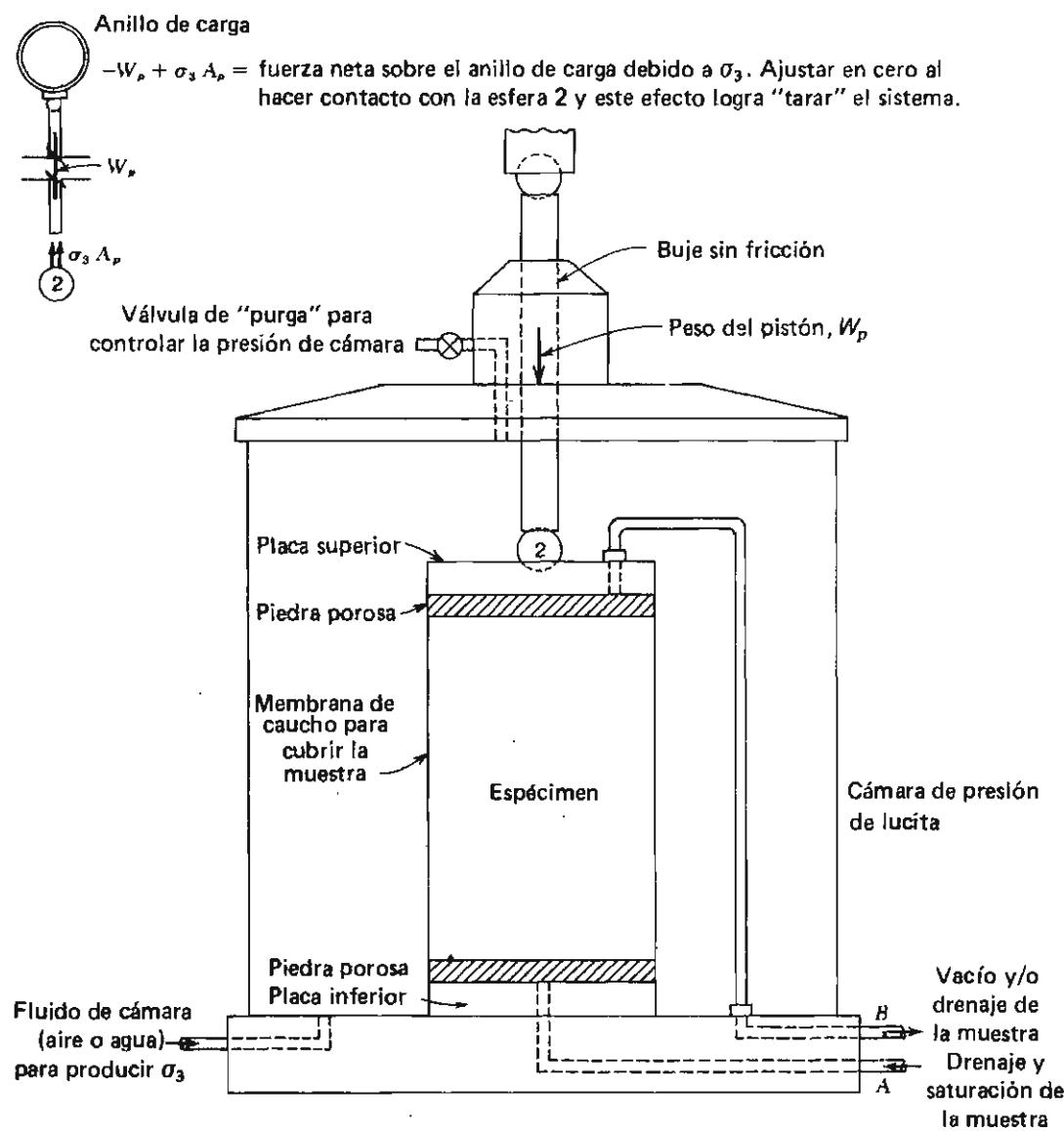


Figura 15-2

Detalles del circuito de una cámara triaxial. Nótese que se necesitan válvulas de paso en las tuberías A, B y C. Si se utiliza un sensor electrónico de carga, debe localizarse sobre una conexión en T en el tubo A.

tasa de aplicación de esfuerzos es tan lenta que dentro de la muestra *no existe exceso de presión de poros* durante el ensayo. Para distinguir entre los diferentes tipos de ensayo que pueden ser hechos abriendo o cerrando la válvula de salida de presión del fluido de los poros, se describen tres ensayos a continuación.

1. *Ensayo no drenado* — También llamado *ensayo no consolidado-no drenado* o ensayo U. Este ensayo se hace con la *válvula de drenaje cerrada* para todas las fases del ensayo y antes de que la muestra tenga posibilidades de consolidarse (si $S < 100\%$). El ensayo se comienza inmediatamente después de estabilizar la presión en la cámara. Para ensayos de grano fino y particularmente si S es diferente de 100%, debería haber muy poca diferencia si la válvula de drenaje se cierra o abre durante el ensayo. El experimento no puede utilizarse para un suelo cohesivo de $S = 100\%$.

2. *Ensayo consolidado-no drenado*. También llamado ensayo consolidado-rápido o CU. Este ensayo se hace después de que la muestra se ha consolidado con la válvula de drenaje abierta bajo una presión de cámara constante. Se necesita algún aparato que permita controlar la muestra para determinar cuándo ha terminado el cambio de volumen (o cesado el drenaje del fluido de los poros) indicando que la consolidación ha terminado. Como la consolidación toma un tiempo considerable en materiales arcillosos, se han desarrollado técnicas especiales tales como hacer un núcleo de arena en el espécimen o utilizar bandas de papel de filtro o de algodón espaciada alrededor del perímetro superficial de la muestra adyacente a la membrana de caucho para acelerar el drenaje.

Cuando se completa la consolidación, se cierran las válvulas de drenaje, y se le aplica el esfuerzo desviador a la muestra hasta la falla. Esta última fase de ensayo es idéntica al ensayo U.

3. *Ensayo consolidado-drenado* — también llamado ensayo consolidado lento o ensayo CD. En este ensayo *se abre la válvula de drenaje*, se aplica la presión de cámara, se controla la consolidación de la muestra, y a continuación, mientras la válvula de drenaje todavía se encuentra abierta, se aplica el esfuerzo desviador. El esfuerzo desviador debe aplicarse a una tasa tan baja que las presiones de poros que siempre se desarrollan durante el proceso de corte, sean suficientemente pequeñas para que los parámetros de suelos no se afecten.

Debido a la necesidad de hacer un control muy detallado y a la cantidad considerable de tiempo necesario, este ensayo sólo es económicamente justificable para grandes proyectos. Mientras este ensayo permite conocer los parámetros verdaderos del suelo (ϕ y c), los parámetros aparentes obtenidos de los ensayos drenado o CU son más reales para la mayoría de los proyectos, dependiendo de cuán rápido se produzca la carga en el sitio, es decir, se aplica un relleno o una carga de cimiento.

RESULTADOS DEL ENSAYO

1. Para cualquier suelo seco (tanto cohesivo como no cohesivo) se obtiene casi los mismos parámetros de suelo de cualquiera de los tres ensayos (U, CU, ó CD).
2. Para un suelo no cohesivo parcialmente saturado o saturado, el ensayo CD da el mismo ángulo ϕ obtenido para el material seco a menos que el material sea fino (bajo coeficiente de permeabilidad) y/o el ensayo se haga a una velocidad de deformación unitaria muy rápida.
3. Todo ensayo hecho sobre suelo cohesivo dará $\phi = 0$ en los ensayos U y posiblemente ángulos ϕ muy pequeños en el ensayo CU.
4. Para cualquier suelo cohesivo saturado los resultados dependen enormemente de cuál de los tres ensayos se use, o sea, los parámetros de suelos varían desde:

$$\left. \begin{array}{l} \phi \approx 0 \\ y \\ c = \text{un valor} \end{array} \right\} \text{ensayo U} \quad \left. \begin{array}{l} \text{hasta } \phi = \text{valor verdadero} \\ y \\ c \approx 0 \end{array} \right\} \text{ensayo CD}$$

para el mismo suelo. Los resultados dependerán también de si el suelo se encuentra normalmente consolidado, sobreconsolidado o si se trata de una muestra remoldeada. La presentación de los datos debe indicar estos factores y el tipo de ensayo utilizado para obtener estos resultados. Los parámetros de suelos también dependen de hacer una asignatura

para las presiones de poros (ver el Exp. No. 16) para resolver la ec. de Coulomb para la resistencia al corte, esto es, es posible medir las presiones de poros en un ensayo CU y corregir los esfuerzos para obtener los parámetros verdaderos del suelo.

5. Para cualquier suelo cohesivo parcialmente saturado, los resultados dependen tanto del grado de saturación como del *tipo de ensayo drenado* hecho. Los resultados de un ensayo no drenado dependerán en forma apreciable del grado de saturación de la muestra de suelo, variando desde

$$\begin{aligned}\phi &= 0 \text{ para } S = 100\% \\ \text{a } \phi &= \text{verdadero valor para } S = 0\end{aligned}$$

DATOS OBTENIDOS

El ensayo triaxial da información para dibujar un círculo de esfuerzos de Mohr utilizando la presión de cámara como σ_3 y el esfuerzo mayor principal correspondiente σ_1 en el momento de la falla de la muestra. Es posible establecer una tangente aproximada a los círculos (o envolventes de esfuerzos), al dibujar entre 2 y 4 círculos de Mohr utilizando datos de ensayos basados en diferentes presiones de cámara σ_3 para cada ensayo sobre muestras de suelo cuya densidad y contenido de humedad sea aproximadamente igual. La pendiente de esta tangente se toma como el ángulo de fricción interna del material, ϕ , del suelo y el intercepto de dicha envolvente de esfuerzos con el eje y , se toma como la cohesión c en la ec. de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (15-1)$$

Para suelos no cohesivos, el intercepto de cohesión debe ser muy pequeño a menos que el suelo esté tan húmedo que la tensión superficial pueda ser apreciable. Generalmente existe un pequeño intercepto (usualmente llamado *cohesión aparente*) en suelos no cohesivos secos debido a la membrana de caucho utilizada para configurar la muestra y debido a errores de ensayo, pero estos valores generalmente entre 7 y 14 kPa se desprecian. Para valores de cohesión aparentemente mayores que éstos, debe investigarse la posible razón de su ocurrencia. Para un ensayo único sobre suelo no cohesivo ($c = 0$), el ángulo de fricción interna del material puede calcularse a través de la geometría del círculo de Mohr como:

$$\operatorname{sen} \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (15-2)$$

Para obtener el esfuerzo principal mayor σ_1 , es necesario conocer la presión de confinamiento de la cámara pues dicha presión actúa tanto lateralmente como en la base y la superficie superior de la muestra. Por consiguiente, con una presión de cámara de 70 kPa, el valor de σ_3 es 70 kPa, y en ese instante, antes de cualquier carga, el valor de σ_1 es también kPa. Con la aplicación de carga externa a través del pistón de carga, el esfuerzo principal mayor se incrementa de la siguiente forma:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{P}{A'} \quad (15-3)$$

donde P = la carga instantánea sobre el espécimen algún tiempo después de haber comenzado el ensayo

A' = el área corregida del espécimen, como en el experimento No. 14,

$$A' = \frac{A_0}{1 - \epsilon} \quad (14-4)$$

El pistón de carga que aplica la fuerza adicional al espécimen debe ser maquinado cuidadosamente y montado con un soporte de esfera para garantizar una aplicación de carga axial sin fricción (casi), hermético, a la muestra que se encuentra dentro de la cámara triaxial.

El valor de P/A' de la ec. (15-3) a menudo se conoce como *esfuerzo desviador*, un término que ya se utilizó en esta discusión. Es evidente que las lecturas de carga y deformación deben obtenerse para este ensayo en forma similar a las del ensayo de compresión in-

confinada y que es necesario hacer una gráfica bien del esfuerzo desviador P/A' o del esfuerzo principal σ_1 contra la deformación unitaria. El valor pico del esfuerzo (o el valor del esfuerzo al cual se produce un 20% de deformación unitaria si ocurre primero) se toma del gráfico esfuerzo-deformación unitaria como el esfuerzo principal mayor, o el máximo esfuerzo desviador, para utilizarlo en el dibujo del círculo de Mohr correspondiente.

Si se conecta una bureta calibrada a la línea de drenaje a la salida de la muestra y si la muestra se encuentra saturada, es posible observar los cambios de volumen producidos bajo diferentes esfuerzos desviadores. La terminación del ensayo de consolidación para ensayos consolidados puede también determinarse utilizando la conexión de la bureta ya que no debe ocurrir cambio de volumen o cambio de nivel en el agua de la bureta después de completarse la consolidación y previa la aplicación del esfuerzo desviador. Si la muestra no está saturada, los cambios de volumen que suceden en la muestra pueden no ser muy adecuadamente indicados por el nivel de agua en la bureta ya que el agua podría en lugar de drenar permanecer dentro de la muestra, produciendo un pequeño cambio en el contenido de humedad.¹

Existen aditamentos especiales, o pueden construirse, para medir la presión de poros en la muestra y los cambios en la presión de poros bajo carga. Este método de ensayo triaxial se considera independientemente en el experimento No. 16.

Los diámetros para muestras de ensayo se han normalizado de forma que las plataformas de carga y las piedras porosas requeridas para el ensayo se puedan instalar en cámaras de un solo tamaño, dándole así una gran versatilidad a la cámara de presión. Los diámetros más comunes son:

36, 47, 50, 63.5, 71, 76 y 100 mm (dimensiones nominales)

Se requieren membranas de caucho para confinar el espécimen, y éstas se consiguen en todos los diámetros antes mencionados.² La relación longitud/diámetro debe ser:

$$2 < L/d < 3$$

como para el ensayo de compresión inconfinada.

La tasa de deformación unitaria puede tomarse como:

0.5 a 1.25 mm/min

excepto para el ensayo CD donde es necesario producir tasas de deformación unitaria del orden de 0.0025 mm/min o menos, dependiendo del tamaño de la muestra y de la gradación.

ENSAYOS TRIAXIALES ESPECIALES

1. La cámara triaxial puede utilizarse para hacer ensayos de laboratorio utilizando consolidación *isotrópica* o *anisotrópica*.

a. Consolidación isotrópica — montar la muestra del tamaño deseado en la membrana. Aplicar la presión de cámara σ_3 y colocar el tubo de drenaje de la muestra en un recipiente de agua de forma que pueda drenar sin desecación (o conectar a un aparato volumétrico de forma que sea posible controlar la consolidación). Utilizar bandas de papel de filtro o de algodón entre la membrana y el suelo para acelerar la consolidación. Utilizar papel de filtro entre las piedras porosas y el suelo para reducir la contaminación de la piedra.

b. Consolidación anisotrópica — montar la muestra tal como se hizo para consolidación isotrópica. Construir un sistema de carga por peso muerto y aplicar carga vertical en

¹ Ver el Exp. No. 16 para conocer un método de determinación del cambio de volumen en muestras de suelo parcialmente saturado.

² Una solución muy económica para las muestras de 36 y 38 mm de diámetro de suelos cohesivos es la de utilizar condones (obtenibles en cualquier droguería) como membrana. Es necesario cortar el extremo con un par de tijeras, ponerlo en la placa de carga inferior, colocar la muestra, y luego simplemente desenrollar la membrana sobre la muestra sin usar el aparato para expandir la membrana; el arreglo del ensayo toma cerca de media hora si se usa el expander de membrana.

conjunción con presión de cámara σ_3 , para desarrollar la relación de esfuerzos deseada de:

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$$

2. Utilizando cámaras triaxiales es posible hacer ensayos de suelo para condiciones de:

$$\sigma_v < \sigma_3 \quad (\text{el esfuerzo vertical normalmente es mayor})$$

pero esto requiere una o ambas de las siguientes condiciones:

- a. Modificación de la cámara para aislar el esfuerzo vertical del esfuerzo lateral (i. e., para muestras de pequeño diámetro, es necesario volver a maquinar el pistón/cabezote de carga a un tamaño igual al de la muestra de forma que no actúe σ_3 en la parte superior de la muestra).
- b. Hacer el ensayo utilizando el sistema de carga externa y carga de incremento utilizando pesas; con algo de esfuerzo por peso muerto y presión de cámara, remover los pesos muertos (reduciendo el esfuerzo vertical) en incrementos hasta que suceda la falla. La carga muerta puede ser un gran recipiente con agua con una válvula de drenaje, colgado de la cámara de carga por medio de un soporte colgante adecuado.

3. Es posible también hacer ensayos dinámicos cílicos. Estos ensayos requieren equipo especial no fácilmente disponible en la mayoría de los laboratorios de suelos. Los pasos en un ensayo dinámico deben incluir (ver también Silver y Park, 1975):

- a. Moldear la muestra a la densidad deseada.
- b. Aplicar una deformación unitaria deseada ϵ de, por ejemplo, 2%, 4%, etc.
- c. Aplicar deformación unitaria cíclica (a menudo $\pm \epsilon$ del paso 2) a una frecuencia dada (Hz).
- d. Utilizando equipo electrónico para registro de información, registrar los esfuerzos en la cámara de carga a la deformación unitaria correspondiente. Hasta que la muestra se deforme excesivamente, la curva cíclica esfuerzo-deformación unitaria (obtenida utilizando como registro electrónico directo algún tipo de registrador gráfico) es parecida a la que se muestra en la Fig. 15-3.

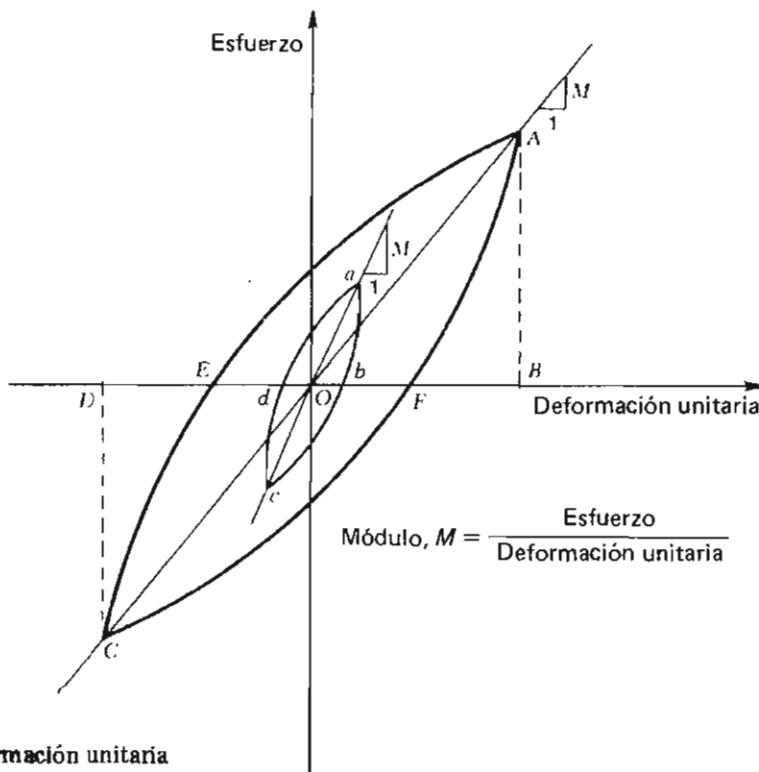


Figura 15-3
Gráfico cualitativo de esfuerzo-deformación unitaria para un ensayo de corte cíclico.

- e. Aplicar un nuevo incremento en la deformación unitaria ϵ , y repetir los pasos c y d hasta que la muestra "falle". La Fig. 15-3 ilustra resultados típicos (y cualitativos) de dos incrementos de deformación unitaria a niveles de deformación unitaria bajos. Esta curva típica se distorsiona considerablemente a niveles de deformación unitaria mayores.

Los ensayos cíclicos pueden hacerse utilizando deformación unitaria de compresión (axial) o deformación unitaria cortante. Si se utiliza deformación unitaria axial, el módulo dinámico de deformación (M de la Fig. 15-3) es el módulo dinámico de elasticidad convencional E_{sd} . Si se utiliza deformación unitaria cortante, el módulo obtenido es el módulo cortante dinámico de elasticidad G_d ; es posible calcular para cada incremento de deformación unitaria un factor de amortiguamiento dinámico, i. e., como:

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{área del anillo } AFCE}{\text{área de los triángulos } OAB + ODC} \quad (15-4)$$

de la Fig. 15-3. La deformación unitaria pico a pico es (de la Fig. 15-3, ensayo No. 2)

$$\epsilon_{pp} = BD$$

con una amplitud de $BD/2 = OB$

MODULO DE RESILIENCIA

A veces el ensayo triaxial es llevado a cierto nivel de esfuerzo, por ejemplo, 0.25 a 0.50 del valor último estimado, el esfuerzo desviador reducido a cero y reaplicado a continuación. Esta secuencia puede repetirse 3 a 5 veces; en el último ciclo el esfuerzo desviador se continúa hasta la falla de la muestra (ver la Fig. 15-8, ensayo 1). Existe una extendida opinión sobre el hecho de que el *módulo tangente inicial* (que es algo mayor que en el ciclo inicial con el crecimiento considerado debido al proceso de "endurecimiento por deformación") es una estimación mejor del módulo de elasticidad que cualquier otra forma de obtención.

Al hacer este ensayo, es necesario tener cuidado en descargar la muestra del esfuerzo desviador para obtener una nueva deformación unitaria a un esfuerzo desviador de cero ya que la muestra desarrolla deformación permanente (plástica) y muy poca recuperación elástica se obtiene como se muestra en los datos reales (pero editados) de la Fig. 15-7. Esto puede lograrse:

1. Descargando inmediatamente la muestra (esfuerzo desviador = 0; la rama de descarga de la curva de esfuerzo de deformación unitaria es de interés académico únicamente).
2. Reaplicando cuidadosamente una pequeña cantidad de incremento de carga y leyendo nuevamente el deformímetro. La diferencia entre la lectura de cero y esa lectura será la deformación plástica de la muestra al final del ciclo de carga.

Procedimiento

A. SUELO NO COHESIVO—TRABAJO DE LABORATORIO

1. Acoplar la placa de base de carga a la base de la cámara.¹ Montar una membrana de caucho de diámetro apropiado en la placa de carga de base (referirse a las Figs. 15-2 y 15-4) utilizando bandas de caucho o sellos de aro para fijarla. Para proveer una unión bastante impermeable, podría recubrirse la placa de base con grasa de silicona antes de ajustar la membrana; esto incrementará el sello entre la membrana y la placa.

Algunas personas acostumbran a medir el espesor de la pared de la membrana de forma que sea posible ajustar el área para determinar el área inicial de la muestra; sin embargo, para cálculos ordinarios el autor opina que este procedimiento introduce una precisión ficticia en los resultados.

Colocar una piedra porosa en la placa de carga de base. Si el suelo está saturado o va a ser saturado, la piedra porosa debería saturarse antes de usarla.²

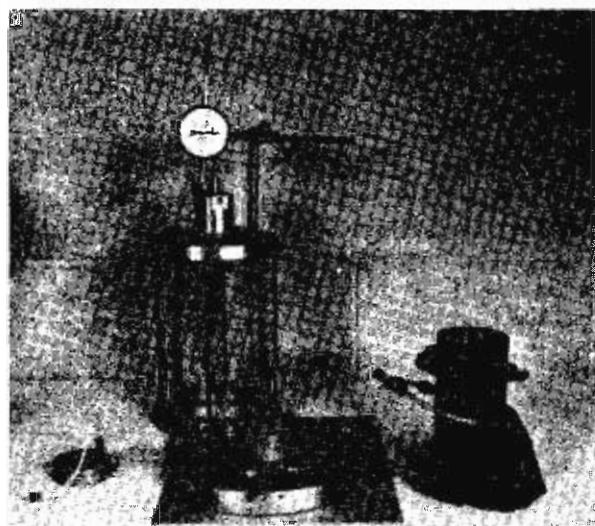
¹Para arena, la placa de base debe tener por lo menos 63 mm de diámetro; si hay gravas presentes, el diámetro debería ser por lo menos seis veces mayor que el tamaño de partícula.

²Ver paso 1 del procedimiento A, del Experimento No. 16.

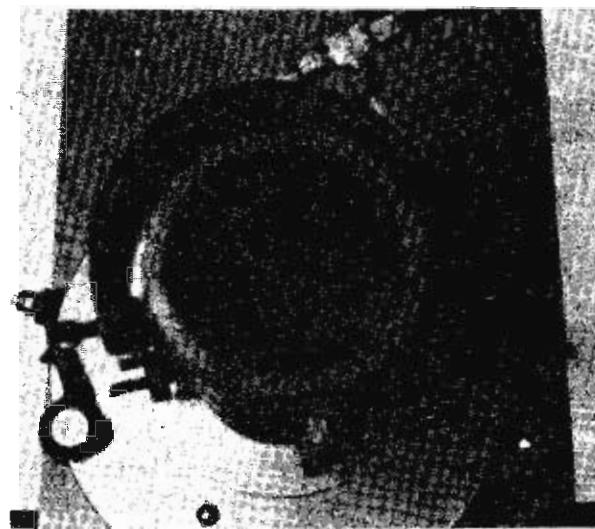
Figura 15-4

Detalles de la construcción de la muestra en un ensayo triaxial sobre material no cohesivo.

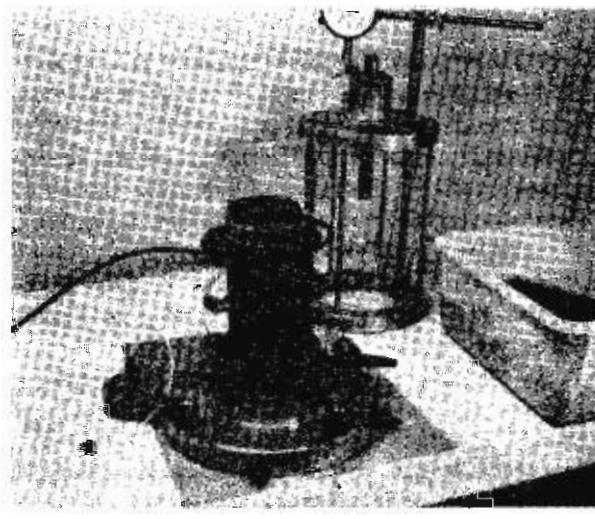
(a) El equipo necesario incluye cámara, dos piedras porosas, expansor de membranas, membrana y placas de base superior e inferior de tamaño adecuado.

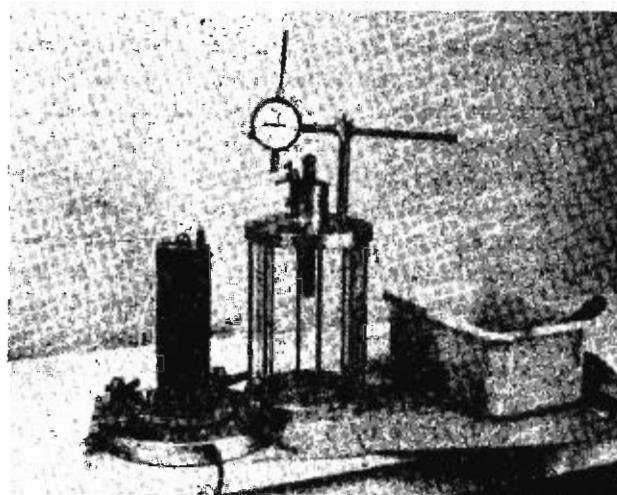


(b) Membrana, dentro del expansor, colocada sobre la placa de base inferior y sobre la piedra porosa inferior.

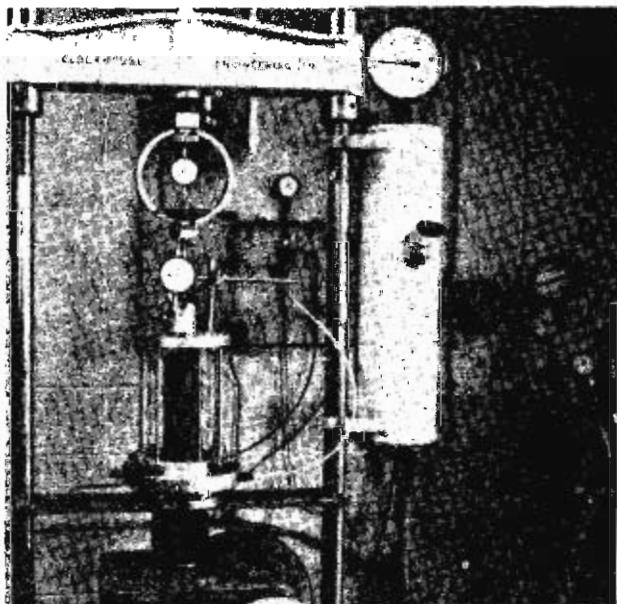


(c) Muestra de arena húmeda (en este caso) casi terminada y nivelada con el tope del molde/expansor de membrana. A continuación se coloca la piedra porosa.





(d) Muestra terminada, sin expansor de membranas y pistón con esfera lista para ajustar la cámara.



(e) Cámara en posición sobre una máquina de compresión: El deformímetro superior registra la carga en el anillo, el deformímetro inferior el cambio de altura de la muestra. El tanque de la derecha es un recipiente que permite el despegue de presión de aire en el equipo usado generalmente por el autor. A la derecha se muestra un sistema de doble-reducción de presión (con manómetros en sistemas fps y métrico) que permite un control ajustado de la presión de cámara y permite un costo razonable ya que aún con filtrado de aire contiene agua y es corrosivo para sistemas demasiado costosos de control de presión.

2. Pesar el recipiente de arena seca de forma que se pueda obtener la densidad de la muestra y duplicarse en los ensayos subsiguientes.

Si es necesario producir una muestra de densidad dada, la arena seca debe mezclarse con un porcentaje conocido de agua de forma que pueda compactar la muestra húmeda. Es casi imposible producir una densidad dada, especialmente densidades mayores, utilizando muestras secas.

3. Colocar un molde para muestra alrededor de la membrana de caucho y doblar su parte superior hacia abajo por encima del molde. No la doble, sin embargo, si el molde es tan grande como para que la membrana se rasgue en el proceso. Si es posible deben utilizarse expansores de membrana para el proceso de moldeo de la muestra. Cuando sea posible utilizar un molde del tipo de cilindro dividido, conectado a una bomba de vacío, puede ser necesario aplicar grasa de silicona sobre la junta del cilindro para permitir un sello al vacío más eficiente. Para el expansor de tipo dividido y los demás tipos de expansores que utilicen vacío, puede también ser necesario utilizar pequeñas bandas de papel de filtro entre la membrana y la pared del expansor de forma que el vacío trabaje efectivamente sobre toda la altura del expansor de membranas.

4. Colocar cuidadosamente la arena en la membrana utilizando un compactador para mantener la forma de la muestra y su densidad. Cuando se desea producir una muestra de densidad requerida, para mantener la densidad constante a través de la altura de la muestra, puede ser deseable dividir la altura en partes iguales, calcular la cantidad de suelo (húmedo) necesario para llenar cada altura, y colocar tal cantidad en cada segmento de la muestra. Este proceso no es fácil y la muestra puede requerir varios intentos en su preparación antes de lograr el estado de densidad deseado.
5. Colocar una piedra porosa (saturada) para suelo húmedo y a continuación colocar la placa superior de la muestra. Puede también ser necesario cubrir el borde superior de la placa con grasa de silicona para obtener un sello hermético. Enrollar la membrana fuera del molde hacia la placa superior y sellarla con bandas de caucho o sellos de anillo. Con un nivel pequeño revisar la nivelación de la placa superior.
6. Conectar el tubo de la placa o cabezote superior a la salida de la bomba de vacío (ver Fig. 15-2) en la base de la cámara y aplicar un vacío entre 200 y 250 mm de mercurio a la muestra (la salida B está cerrada).
7. A continuación remover el molde del espécimen y examinar la membrana de forma que no existan filtraciones evidentes. Si se encuentra alguna, la muestra debe ser desbaratada y vuelta a montar sobre una nueva membrana.
8. Obtener cuatro medidas de altura separadas aproximadamente 90° y utilizar el valor promedio como altura inicial de la muestra L_0 . Tomar en la parte superior, a media altura, y en la base dos lecturas del diámetro separadas 90° , utilizando un par de calibradores con una precisión de 1 mm. Calcular el valor promedio del espécimen a cada altura y calcular el valor final promedio del diámetro de la muestra como:

$$d_{av} = \frac{d_t + 2d_m + d_b}{4}$$

donde d_t es el diámetro promedio para las medidas de la cabeza, etc. Calcular los valores iniciales correspondientes al área de la muestra A_0 utilizando los diámetros promedio recién calculados.

9. Colocar el cilindro de lucita sobre la base de la cámara,¹ asegurando que la base se encuentre totalmente limpia de grano de forma que se logre un sello totalmente hermético. Colocar la cámara en la máquina de compresión y hacer contacto ligero del pistón de carga y la barra de carga (o cruceta) de la máquina de compresión.
10. Aplicar una presión lateral predeterminada a la cámara (preferiblemente en múltiplos pares de N/m^2 para facilidad de cálculo) utilizando aire comprimido y simultáneamente el vacío del interior de la muestra a cero. Algunas personas prefieren utilizar líquido en la cámara (a menudo agua con un anticorrosivo o glicerina) más que aire comprimido. El líquido tiene la ventaja de proporcionar una presión más uniforme y de ser bastante más viscoso, y por consiguiente, menos sensible a las filtraciones de las membranas. En los laboratorios para estudiantes tiene la desventaja de requerir más tiempo de laboratorio (para sifonamiento de la cámara al final del ensayo) y de ser más sucio —especialmente cuando ocurre alguna filtración. Ahora con el vacío cerrado en A, abrir la salida B (Fig. 15-2) y verificar que no hay presión de aire, lo cual indicaría una filtración en la muestra y la necesidad de volver a iniciar.
11. Si se desea saturar la muestra, abrir las válvulas apropiadas y conservar la muestra hasta que se sature.² Un pequeño vacío sobre la muestra puede utilizarse para acelerar el proceso de saturación. En forma alternativa, es posible utilizar una presión positiva (*contrapresión*) de un valor menor que σ_3 , por ejemplo, $\sigma_3/2$, aplicada al recipiente de saturación. Si es necesario usar una gran contrapresión, la muestra sencillamente se romperá. El pistón de carga debe estar ajustado sin holgura al cabezote del espécimen de

¹ Nótese que es posible suministrar la presión lateral de σ_3 por el vacío sobre las muestras no cohesivas secas. Si se utiliza vacío, no es necesario utilizar la tapa de la cámara. El máximo σ_3 confiable no podrá ser mayor de 90 a 96 kPa, dependiendo de la eficiencia de la bomba de vacío.

² Ver Exp. No. 16 para refinamientos en saturación de muestras de suelo no cohesivo.

forma que la muestra no se expanda bajo la contrapresión, aunque esto nunca debería ocurrir para contrapresiones menores que la presión de cámara.

12. Cuando se aplica la presión de cámara, puede verse que el deformímetro de carga (o DVM) registra una carga hacia arriba que es la *diferencia* entre el peso del pistón de carga y la presión de cámara hacia arriba sobre la base del pistón. A continuación, levantar cuidadosamente la cámara hasta que el deformímetro de carga (o DVM) registre una carga, que indique que se ha hecho nuevamente contacto con el pistón. Seguidamente, ajustar en cero el deformímetro de carga (o DVM) para lograr la tarea aproximada del sistema. Si esto se hace el deformímetro de carga o DVM registrará el valor correcto del esfuerzo desviador para lograr de esta forma cálculos más sencillos.
13. Conectar un deformímetro de carátula (con lecturas a una precisión de 0.01 mm/división) a la máquina de forma que se pueda obtener la deformación de la muestra en cada instante. Establecer el cero en el deformímetro de carátula, a continuación comprimir manualmente y soltar el émbolo del deformímetro varias veces y observar la lectura de cero. Reajustar el deformímetro a cero si es necesario. Nótese que podría usarse una LDVT en lugar de diámetro de deformímetro de carátula pero esto no es acostumbrado ni recomendable para ensayos de laboratorio con fines docentes.

Verificar la información de deformímetro, del deformímetro de carga, y del manómetro de presión de cámara para correcciones finales.

14. Hacer la compactación a la tasa de deformación unitaria deseada (generalmente entre 0.5 y 12.5 mm/min.) especificada por el instructor.
15. Prender la máquina de compresión y tomar lecturas simultáneas de cargas y deformación utilizando los formatos respectivos. Deben tomarse lecturas a:

5, 15, 25, 50 y cada 50 a 100 divisiones del deformímetro hasta que:

- a. la carga disminuya.
- b. se sobrepase ligeramente en 20% la deformación unitaria.
- c. la carga se mantenga constante durante tres o cuatro lecturas.

Calcular el esfuerzo correspondiente (kPa) y la deformación unitaria para suficientes lecturas que permitan definir la curva de esfuerzo-deformación unitaria (8-12 puntos).

Asegurarse de controlar el manómetro de presión de cámara y no permitir variaciones en la presión en más de 0.05 kg/cm² (5kPa). Toma sólo muy poca presión cambiar considerablemente el esfuerzo desviador que define "fallas".

16. Despues de que falle la muestra, apagar y/o retroceder la máquina de compresión; soltar la presión de la cámara y remover la carga sobre la muestra.
17. Preparar un nuevo espécimen a una densidad aproximada (entre 0.2 y 0.5 kN/m³) y hacer dos ensayos adicionales. Esto completa el trabajo de laboratorio, referirse al procedimiento C, para completar el informe.

B. SUELO COHESIVO—TRABAJO DE LABORATORIO

1. Preparar dos o tres muestras cilíndricas de adecuada relación L/d . Alternativamente, compactar tres o cuatro muestras del mismo contenido de humedad y esfuerzo de compactación utilizando el aparato de Harvard miniatura. Este último procedimiento permite producir muestras de diámetro nominal de 33 mm. y de adecuada relación L/d .¹
2. Obtener cuatro medidas de la altura separadas aproximadamente 90° y utilizar el valor promedio como altura inicial promedio L_0 de la muestra. Tomar dos lecturas del diámetro en la parte superior, a la mitad, y en la base separadas 90° utilizando un par de calibradores

¹ Es también posible compactar muestras en el molde patrón de compactación (incluyendo el collar) y utilizar posteriormente una herramienta de moldeo para disminuir el diámetro de la muestra hasta un tamaño conveniente para el ensayo.

con una precisión de 1 mm. Calcular el diámetro promedio de la muestra a cada localización y calcular posteriormente el diámetro promedio final de la muestra como:

$$d_{av} = \frac{d_t + 2d_m + d_b}{4}$$

donde d_t es el diámetro promedio basado en las dos mediciones superiores, etc. Calcular el valor correspondiente del área inicial A_0 utilizando d_{av} de la ec. anterior.

3. Tomar el tamaño correcto (exacto hasta + 6 mm de diámetro mayor) del expansor de membrana y fijar la membrana suavemente en el expansor, doblando los extremos de la membrana sobre los extremos del expansor (Fig. 15-5). Conectar el tubo del expansor de la membrana a una fuente de vacío y aplicar vacío. Si no hay filtraciones, la membrana permitirá un ajuste suave del expansor bajo la acción del vacío. Puede ser necesario colocar pequeñas bandas de papel de filtro o de algodón entre la membrana y las paredes del expansor para hacer efectivo el vacío mientras esté expandiendo la membrana antes del paso siguiente.
4. Dependiendo de la muestra, lubricar suavemente la membrana con vaselina de petróleo, empollarla con polvo de teflón (una sustancia inerte), o como último recurso, humedecerla con agua para que sea más fácil insertar la muestra en la membrana.
5. Insertar la muestra en la membrana y ajustar la placa inferior de la piedra porosa utilizando las bandas de caucho o sellos de anillo para sellar la membrana. Un sello más hermético puede obtenerse si el perímetro de la placa se engrasa ligeramente con grasa de silicosa. Si es posible, conectar la piedra porosa con su placa superior en este momento. Asegurarse de que las piedras porosas estén húmedas o saturadas, dependiendo de la condición de la muestra ya que una piedra porosa absorbería el agua de los extremos de la muestra.
6. Remover la muestra del expansor de membrana y conectar la parte inferior a la base de la cámara triaxial. Además, conectar la parte superior de ésta si no ha sido hecho hasta el momento, teniendo cuidado de no dañar el espécimen.
7. Conectar la línea de vacío entre el cabezote superior y la línea de vacío *pero no aplicar vacío*. Si se va a hacer un ensayo consolidado-no drenado (sobre una muestra saturada), es necesario inundar las tuberías hacia adentro y hacia afuera de la muestra (i. e., la línea de vacío). A continuación cerrar la válvula de la línea hacia la muestra dejando la línea de vacío abierta para drenaje. Se necesita algo de ingenio para asegurar que las líneas, la piedra porosa superior, y el cabezote superior se encuentren saturados. Para muestras no saturadas la saturación de la línea no es necesaria y podría realmente ser dañina.
8. Colocar la cápsula de lucita en la cámara y colocar la cámara sobre la máquina de compresión. Traer la barra de carga en contacto con el pistón de carga hasta que se registre ligeramente algo de movimiento en el deformímetro de carga.
9. Aplicar una presión predeterminada en la cámara (preferiblemente aire comprimido) para presión lateral σ_3 . Para el ensayo consolidado-no drenado sobre una muestra alterada, observar el flujo hacia afuera de la línea de drenaje, y cuando dicho flujo sea cero proceder con los pasos 11 y 12 que se describen a continuación. La línea de drenaje puede conectarse a una bureta calibrada de forma que cuando el nivel del agua permanece constante, se pueda asegurar que la consolidación se ha terminado. Este tipo de conexión permitirá también establecer el cambio de volumen durante la consolidación. Si la muestra no está saturada se vuelve un ejercicio de criterio¹ el determinar cuando ha terminado la consolidación.
10. Si se desea (sobre muestras inicialmente no saturadas) saturar la muestra, abrir la línea de vacío a la atmósfera y abrir la válvula de entrada a la muestra a partir del recipiente de saturación. No aplicar vacíos a la muestra para incrementar el proceso de saturación ya que éste removerá el agua que ya se encuentre en la muestra en el lado del vacío más

¹ Referirse al Exp. No. 16; como alternativa, conectar un deformímetro de carátula y registrar cuando haya terminado el movimiento vertical como una indicación de 100% de consolidación.

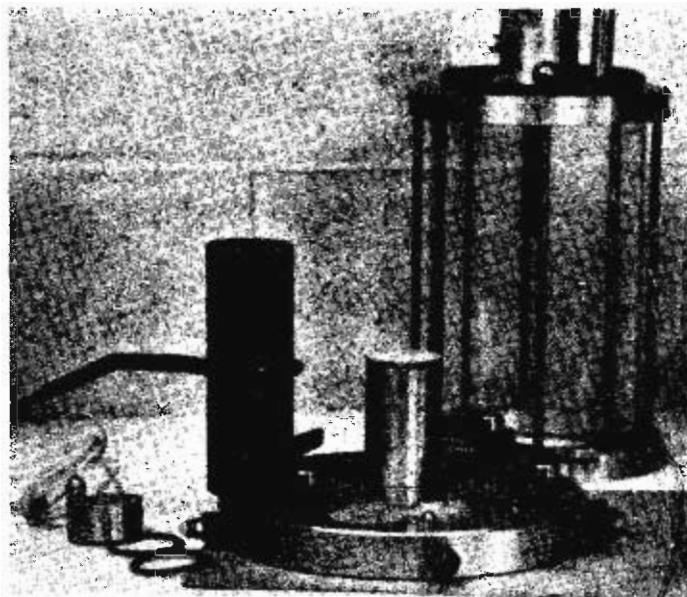
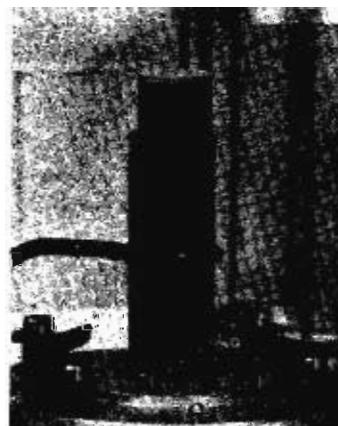
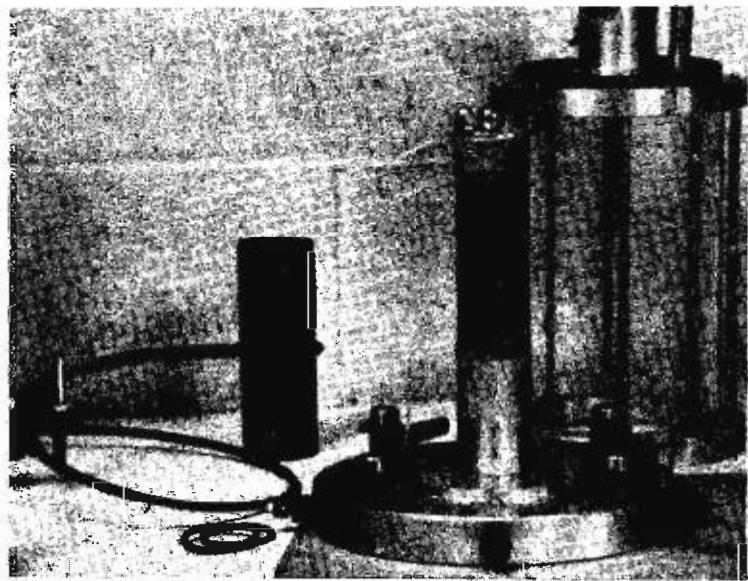


Figura 15-5
Ensayo triaxial en suelo cohesivo.

(a) Se aprecia la membrana montada en el expensor con el vacío aplicado. En este caso el expensor debe tener una holgura de 3.0 mm con respecto al diámetro de la muestra.



(b) El expensor de membranas debe colocarse sobre la placa de base inferior (con la piedra porosa en su sitio) e insertar la muestra sin dificultad pues el expensor es de mayor diámetro. Colocar la piedra porosa y la placa superior en su sitio y enrollar la membrana para sellar la muestra, son operaciones bastante sencillas.



(c) Al remover el expensor de membranas, la muestra está lista para el montaje de la cámara. El resto del ensayo es igual al que se ha descrito antes para suelos no cohesivos (con ajustes para los ensayos tipo U, CU o CD).

rápidamente que la tasa a la cual entrará el agua a la muestra desde el recipiente de saturación debido a la baja permeabilidad de la muestra. Tomará un tiempo muy largo saturar aún muestras muy pequeñas de suelo cohesivo. Si es posible introducir una pequeña presión positiva al recipiente de saturación para acelerar el proceso la eficiencia de la saturación será mayor.

11. Si la muestra se encuentra saturada (y/o consolidada) y se desea medir los cambios de volumen inducidos, abrir las válvulas apropiadas para llenar las líneas en ambos lados de la muestra y cerrar a continuación las salidas. Abrir la línea del indicador de la muestra saturada cuando se haga el ensayo consolidado. Es posible colocar una serie de bandas de papel de filtro o algodón entre la muestra de suelo y la membrana en el paso No. 5.

A partir de este punto, consultar los pasos 12 al 17 del Procedimiento A y todo el Procedimiento C, pues el trabajo es idéntico.

C. CALCULOS:

1. Calcular la deformación unitaria a partir del deformímetro como:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

y llenar la columna respectiva del formato. Calcular igualmente el área corregida:

$$A' = \frac{A_0}{1 - \epsilon}$$

y colocar ésta en la columna adecuada del formato (ver Figs. 15-6 y 15-7).

2. Calcular la fuerza desviadora utilizando las lecturas del deformímetro de carga. Si se utiliza un anillo de carga la fuerza desviadora es:

$$P = \text{lectura del deformímetro de carga} \times \text{constante del anillo de carga}$$

donde la lectura del deformímetro de carga se registra en unidades de deflexión. Poner estos datos en la columna apropiada del formato.

3. Calcular el esfuerzo desviador:

$$\sigma = \frac{P}{A'}$$

y llenar adecuadamente la columna respectiva del formato.

4. Dibujar la curva de esfuerzo desviador contra deformación unitaria (sobre las abscisas) y obtener el esfuerzo en el punto máximo a menos que haya ocurrido primero un 20% de deformación unitaria (ver Fig. 15-8). Mostrar este valor de esfuerzo desviador sobre la gráfica. Dibujar los tres ensayos en la misma hoja, pero asegurarse de que las curvas se identifiquen por sus valores correspondientes de esfuerzo de confinamiento.
5. Con el esfuerzo desviador máximo obtenido del paso 4, calcular el esfuerzo principal mayor para cada ensayo como:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma$$

6. Dibujar los círculos de Mohr para los tres ensayos sobre el mismo gráfico y dibujar la tangente a esos círculos. Medir la pendiente de dicha tangente como correspondiente al ángulo de fricción interna ϕ del material y mostrarla en dicha gráfica. Medir el intercepto con el eje y para la cohesión del suelo y mostrar este valor sobre la gráfica. Para suelos no cohesivos, un valor grande de cohesión aparente debería ser discutido ampliamente en el informe.

7. Calcular ϕ para cada ensayo sobre suelos no cohesivos utilizando la ec. (15-2). Determinar el promedio de los valores y comparar el valor obtenido del dibujo de los círculos de Mohr del paso 6 anterior. Deducir la ec. (15-2) en la hoja de cálculos si se ha hecho el ensayo sobre el suelo no cohesivo.

8. Calcular:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad \text{y} \quad q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

para cada ensayo y dibujar los puntos (p, q) utilizando p como abscisa. Unir los puntos con una línea suave (llamada *trayectoria de esfuerzos* o línea K). Tomar una línea promedio a través de la curva y medir la pendiente a y el intercepto q con el eje (valor de la ordenada) como a .

Calcular ϕ basado en

$$\operatorname{sen} \phi = \tan \alpha$$

y calcular la cohesión como:

$$c = \frac{a}{\cos \phi}$$

Comparar estos valores de ϕ y c con los que se obtuvieron en el paso 6. ¿Cuál sería el significado práctico de utilizar el esfuerzo desviador a una deformación unitaria específica (por ejemplo, 10%) para obtener σ_1 para calcular p y q con el fin de dibujar la curva K en lugar de los valores pico?

9. Calcular el *módulo tangente* y el *módulo secante* utilizando las pendientes de las curvas de esfuerzo-deformación unitaria a la mitad del esfuerzo pico para el módulo tangente y el origen y la mitad del esfuerzo pico para el módulo secante. Comentar sobre la localización a lo largo de la curva esfuerzo-deformación unitaria utilizada y sobre las diferencias obtenidas en dicho valor.
10. Mostrar en un dibujo claro y sencillo el montaje de laboratorio utilizado como parte de su informe independientemente del tipo de suelo utilizado.
11. Si se ha utilizado suelo cohesivo en el ensayo, asegurarse de comentar en el informe y *demostrar sobre la gráfica de círculos de Mohr* el tipo de ensayo ejecutado (o sea, ensayo U, ensayo CU o ensayo CD) y si el suelo se encontraba saturado o no.
12. Utilizando la ley generalizada esfuerzo-deformación unitaria de Hooke como:

$$\epsilon = \frac{1}{E_s} (\Delta \sigma_1 - 2\mu \sigma_3)$$

donde: ϵ = deformación unitaria en dos puntos de la curva esfuerzo-deformación unitaria suficientemente cercanos para poder asumir $E_s = \text{constante}$.

$\Delta \sigma_1$ = valores correspondientes al esfuerzo desviador

μ = relación de Poisson

σ_3 = presión de cámara para la curva de interés

Obtener suficientes puntos a lo largo de la curva para determinar el nivel de deformación unitaria al cual la relación de Poisson se vuelve mayor o menor que 0.5 (con lo cual se indica si se ha obtenido un nivel del esfuerzo unitario inelástico). Puede ser útil programar esta relación en un computador o una calculadora de bolsillo programable.

En el informe debe hacerse comentarios adecuados sobre los valores de E_s y μ y el nivel de esfuerzo (y deformación unitaria) a los cuales la relación de Poisson ya no es válida para un material elástico.

ENSAYO DE COMPRESSION TRIAXIAL (Cohesivos, no Cohesivos)

Formato 18

Proyecto ENSAYO DE MÓDULO DE RESILIENCIA Trabajo No. ~

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~

Descripción del Suelo ARCILLA AZUL, $G_s = 2.72$ Profundidad de la Muestra ~

Realizado por J.E.B Y R.G.L Fecha de la práctica 1/12/77

Llenar los vacíos con los datos y unidades adecuadas.

Datos de la muestra

Dimensiones de la muestra: Diám. $D_0 = 3.335$ Área $A_0 = 8.735 \text{ cm}^2$ $L_0 = 7.09 \text{ cm}$ Vol. $V_0 = 62.02 \text{ cm}^3$ Contenido de humedad, $w = 13.7\%$ Grado de saturación, $S = 61.0\%$ Peso, $w_0 = 119.089$

Para suelos no-cohesivos

Peso inicial de recipiente + arena = ~

Peso final del recipiente + arena = ~

Peso de arena usada en el espécimen, $W_0 =$ ~Gravedad específica en la arena $G_s =$ ~Vol. de sólidos en la muestra $V_s =$ ~Vol. de vacíos en la muestra (inicial) $V_r =$ ~Relación de vacíos inicial de la muestra $e_i =$ ~Relación de vacíos de la arena en densidad mínima $e_{max} =$ ~Relación de vacíos de la arena en densidad máxima $e_{min} =$ ~Densidad relativa de la muestra $D_r =$ ~Peso unitario de la muestra (cohesiva, no-cohesiva) $\gamma = W_0/V_0 = \frac{119.08 \times 9.802}{62.02} = 18.83 \text{ kN/m}^3$

Datos de la máquina

Velocidad de carga 0.12.2 ... cm/min (cm o pulg)

Los siguientes datos no tienen aplicación si la máquina puede ajustarse para tratar dichos efectos de las lecturas de carga.

Área seccional del Pistón de Carga, $A_p =$ ~ cm^2 Carga hacia arriba sobre el pistón = $A_p \sigma_3 =$ ~ kg

Peso del pistón de carga = ~ kg

Valor inicial de carga calculado = ~ kg (Si la carga hacia arriba es mayor que el peso del pistón, ignorarlo).

Figura 15-6

Datos preliminares para ensayo triaxial sobre suelo cohesivo.

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Formato 19

Proyecto ENSAYO DE MÓDULO DE RESILIENCIA Trabajo No. ~

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~

Descripción del Suelo ARCILLA AZUL Profundidad de la Muestra ~

Realizado por J.E.B.Y R.G.L. Fecha de la práctica ~

Datos de la muestra: Área $A_0 = 8.735 \text{ cm}^2$ Longitud $L_0 = 2.09 \text{ cm}$
 Constante del anillo de (5.68 N/div)
 Datos de la máquina: Velocidad de carga = 0.127 cm/min Carga LRC = 0.579 kg/div

	Lectura del deformímetro ($\times 0.01$)	Deformímetro de carga	ΔL , pulg. (col. 2 $\times 0.01$)	Deformación unitaria $\Delta L/L_0$	Factor de corrección de área $1-\epsilon$	Área corregida A' (cm^2)	Esfuerzo desviador σ kPa
1	2	3	4	5	6	7	8
1º CICLO	0	0	0	0	1.000	8.74	0
	25	3	0.025	0.004	0.996	8.77	19.4
	50	9	0.050	0.007	0.993	8.79	58.2
	75	16	0.075	0.011	0.989	8.83	102.9
	85	17	0.085	0.012	0.988	8.84	109.3
2º CICLO	78	0	0.078	0.011	0.989	8.83	0
	100	17	0.100	0.014	0.986	8.86	109.0
	125	26	0.125	0.018	0.982	8.89	166.1
	150	29	0.150	0.021	0.979	8.92	184.7
	175	32	0.175	0.025	0.975	8.96	202.9
	200	34	0.200	0.028	0.972	8.98	215.1
3º CICLO	171	0	0.171	0.024	0.976	8.95	0
	180	10	0.180	0.025	0.975	8.96	63.4
	~	~	~	~	~	~	~
4º CICLO	540	0	0.540	0.076	0.924	9.45	0
	550	15	0.550	0.078	0.922	9.47	89.9
	650	46	0.650	0.092	0.908	9.62	291.6
	750	55	0.750	0.105	0.895	9.76	320.1
	1,200	66	1.200	0.169	0.831	10.51	356.8
	1,300	67	1.300	0.183	0.817	10.68	356.4

Nota: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

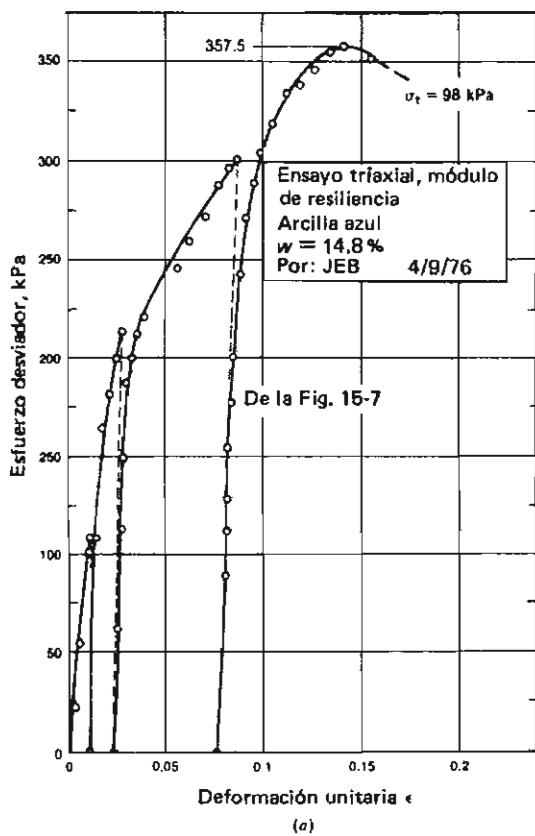
*El cálculo de esfuerzo desviador mostrado se basa en la tasa del sistema de carga, de forma que la lectura del anillo de carga proporciona directamente el valor de la carga desviadora. $\sigma = (\text{Coi. 3} \times \text{LRC}/A')$.

Datos calculados NOTA: DATOS ORIGINALES EDITADOS; DIBUJADO EN LA FIG. 15-8

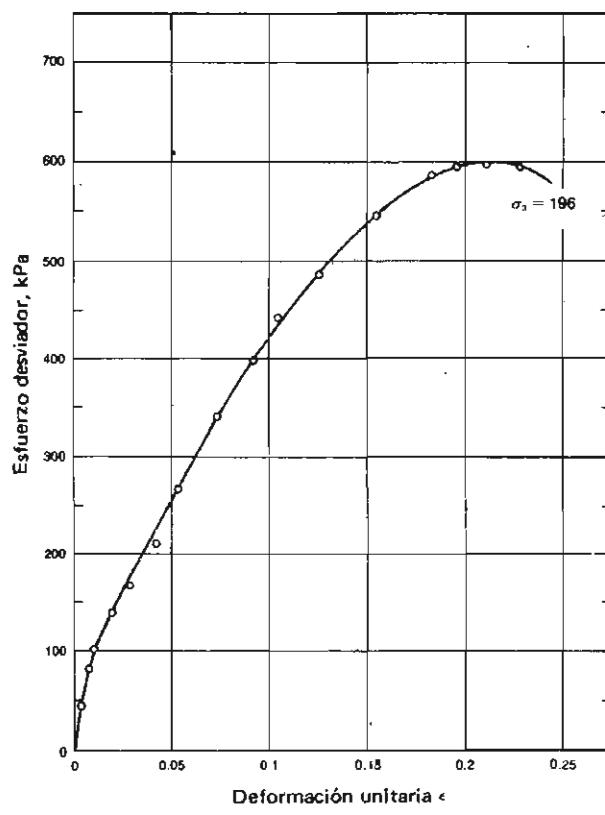
Presión lateral sobre la muestra $\sigma_3 = 98 \text{ kPa} (1 \text{ kg/cm}^2)$ Esfuerzo desviador máximo (de la curva esfuerzo-deformación) $\sigma = 351.5$ Valor máximo del esfuerzo vertical $\sigma_1 = \sigma + \sigma_3 = 455.5$ (USADO EN FIG. 15-9)

Figura 15-7

Datos de esfuerzo-deformación para determinar el módulo de resiliencia para la presión de cámara mostrada.



(a)



(b)

Figura 15-8

Gráficos esfuerzo-deformación

(a) Ensayo de módulo de resiliencia a partir de los datos de esfuerzo-deformación editados en la Fig. 15-7.

(b) Segundo ensayo (presión de cámara de 196 kPa y datos no mostrados) para obtener el máximo valor del esfuerzo desviador.

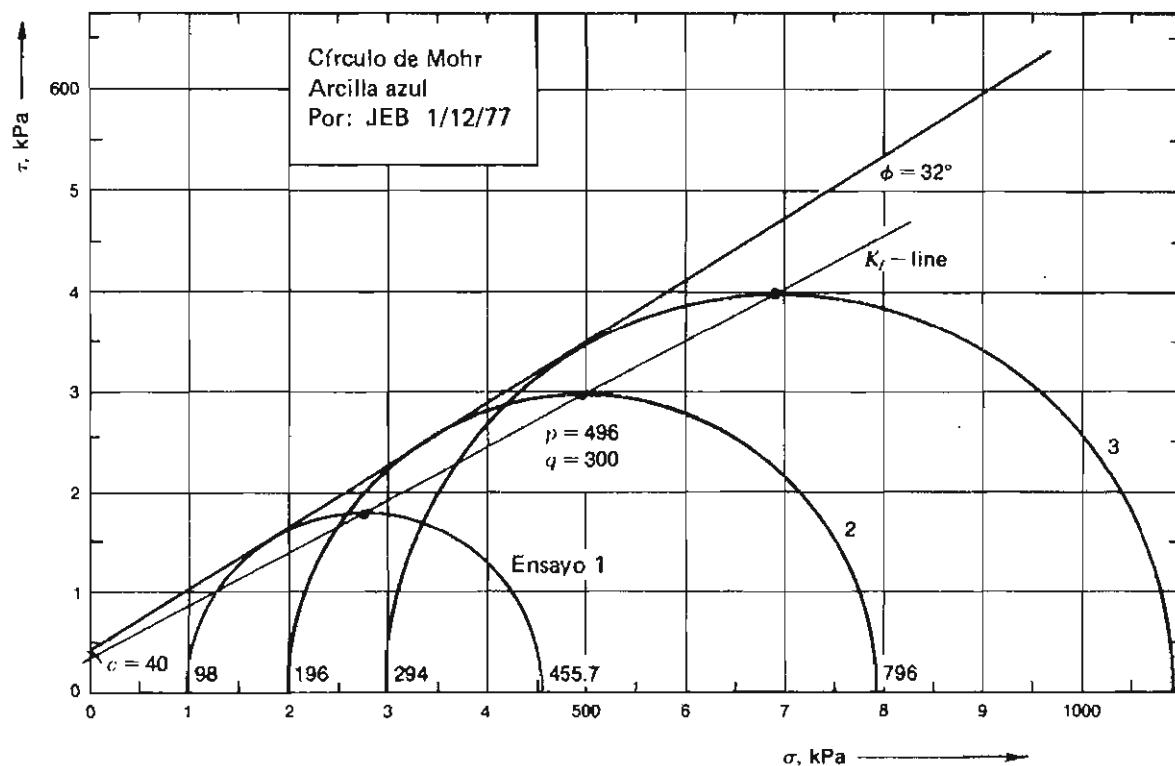


Figura 15-9

Círculo de Mohr para los datos de la Fig. 15-8 y los de un ensayo adicional no mostrado.

Experimento N° 16

ENSAYO TRIAXIAL—CON MEDICION DE PRESION DE POROS

Referencias

Ver Experimento No. 15

Bishop, A. W. y D. J. Henkel (1962); "La Medición de las Propiedades del Suelo en el Ensayo Triaxial"; 2a. edición, Edward Arnolds Ltd., Londres.

Chan, C. K. y J. M. Duncan (1967), Un Nuevo Aparato para Medir Cambios de Volumen y Propiedades en Ensayos Triaxiales en Suelos, *Mater. Res. Stand.*, ASTM, Julio, pp. 312-313.

Skempton, A. W., (1954), Los Coeficientes de Presión de Poros A y B, *Geotechnique*, Londres, Vol. 4, No. 4, Diciembre, pp. 143-147.

Spence, R. A. y T. E. Glynn (1962), Características de Una Arcilla Marina al Esfuerzo Cortante, *J. Soil Mech Found. Div., ASCE SM. 4*, Agosto pp. 85-107 (describe equipo para obtener los parámetros de resistencia de un suelo arcilloso).

Objetivo

Presentar los procedimientos básicos para obtener presiones de poros en el agua y/o cambios de volumen ocurridos durante un ensayo de resistencia al corte de tipo triaxial.

Equipo

Máquina de compresión (preferiblemente de deformación controlada)

Cámara triaxial

Aparato de presión de poros (ver Fig. 16-1) o un transductor de presiones con equipo de registro electrónico.

Molde para la muestra, membranas de caucho, bandas de caucho, y piedras porosas.

Calibradores

Aparato para tallar la muestra (opcional)

Exposición general

Leer la exposición general de los experimentos 14 y 15.

Se ha aceptado por mucho tiempo que la solución de la ecuación de Coulomb

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

no determina realmente los parámetros de suelo c y ϕ para suelos parcialmente saturados cuando se determinan por los métodos presentados en los experimentos Nos. 15 y 17. Esto es así porque una masa de suelo tiene un esqueleto compresible de partículas sólidas. Los vacíos están llenos de agua para formar un sistema de dos fases (cuando $S = 100\%$) o de agua y aire para formar un sistema de tres fases ($S \neq 100\%$) o aire solamente si el grado de saturación es cero por ciento. Los esfuerzos cortantes son asumidos por el esqueleto granular ya que el aire y el agua no pueden asumir esfuerzos apreciables de tipo cortante (a menos que el agua se encuentre en forma de hielo).

Los esfuerzos normales, σ_n en la ecuación de Coulomb, son soportados por las partículas sólidas y el fluido de los poros.

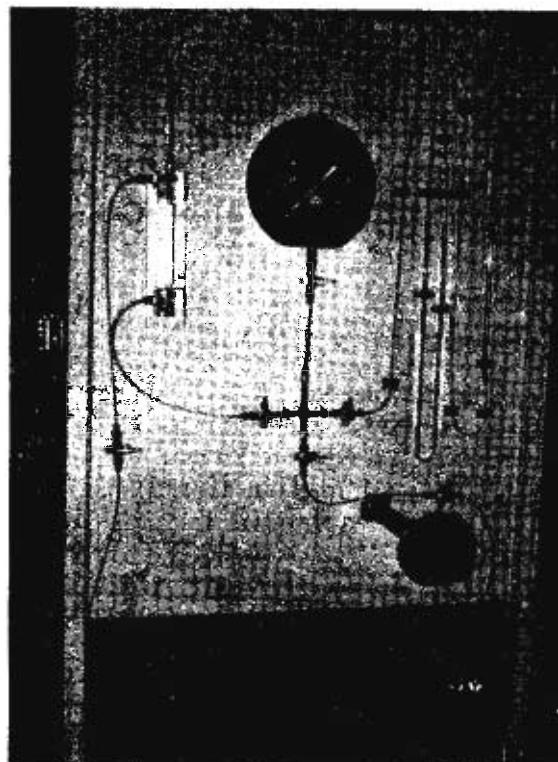


Figura 16-1

Tablero de presión de poros (no comercial). La válvula inferior derecha conecta a una tubería de nylon de 3 mm de diámetro con la muestra de suelo dentro de la cámara. El aparato plástico que se aprecia a la izquierda es el indicador de cero. El tubo en U de la derecha permite medir presiones de poros negativas. La bureta de la extremidad derecha mide el cambio de volumen cuando se abre la válvula del indicador nulo y se cierra la válvula hacia la cruz que hay debajo del manómetro. El disco grande en el extremo inferior derecho es un aparato de medición hidráulico usado para añadir agua al sistema con el fin de forzar el regreso a cero de la columna de mercurio en el indicador nulo (visualmente). Las tuberías deben saturarse antes de ser usadas. Las válvulas críticas deben ser del tipo adecuado para no producir desplazamiento. Se deben usar accesorios de conexión plásticos cuando se prevea contaminación por mercurio.

En cualquier tipo de ensayo cortante (y debe notarse que casi todos los ensayos que permiten determinar la resistencia del suelo son ensayos cortantes), la resistencia al corte se determina generalmente en términos de esfuerzo total, el cual incluye los esfuerzos intergranulares y los esfuerzos del fluido de los poros, como:

$$\sigma_t = \sigma' + u \quad (16-1)$$

donde σ_t = presión total

σ' = esfuerzo intergranular o grano a grano (también llamado esfuerzo efectivo)

u = presión en el fluido de los poros que actúa en la misma forma en todas direcciones y puede considerarse sobre planos de esfuerzo horizontales, verticales o normales.

En términos de esfuerzos efectivos la ecuación de esfuerzo cortante de Coulomb se convierte en:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (16-2)$$

donde c' y ϕ' son parámetros de esfuerzo efectivos, obtenidos cuando se utilizan esfuerzos efectivos σ' calculados a partir de la ec. (16-1). Debería notarse cuidadosamente que la presión de poros de interés puede ser una condición estática o, más a menudo para el suelo que se encuentra debajo del nivel freático, la condición temporal (transitoria) de *exceso de presión de poros*, algunas veces llamado Δu en la literatura, producida debido a la reorientación de la estructura de suelo por cambios en los esfuerzos del suelo a partir de incrementos (y a veces disminuciones) en las cargas de fundación.

Es posible obtener los esfuerzos efectivos σ' de dos formas:

1. Hacer ensayos al corte de manera que el exceso de presión de poros $\Delta u \rightarrow 0$. La presión de poros debida a la reorientación de la estructura nunca puede ser cero, pero si la reorientación se efectúa a una tasa sumamente lenta, la influencia en los parámetros de suelo no es tan significativa.
2. Hacer ensayos al corte de forma que sea posible medir el exceso de presión de poros Δu .

El ensayo consolidado-drenado descrito en el experimento No. 15 representa un intento de satisfacer la condición de:

$$\Delta u \rightarrow 0$$

Aunque este ensayo consume mucho tiempo (con una duración de días y posiblemente de una o varias semanas), es probablemente el más aproximado — particularmente si el grado de saturación $S < 100\%$.

Para suelos saturados, las mediciones directas de la presión de poros durante el ensayo provee la forma más rápida de evaluar los parámetros de esfuerzo efectivos y si se tiene suficiente cuidado en los detalles del ensayo se logran resultados probablemente tan aproximados como en cualquier otro método.

Skempton (1954) propuso la siguiente ecuación para describir el exceso de presión de poros en suelos saturados o no saturados:

$$\Delta u = B(\Delta\sigma_3 + A\{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3\}) \quad (16-3)$$

donde Δu = cambio en la presión de poros debido a cualquier incremento en la presión confinante $\Delta\sigma$ y del esfuerzo desviador $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$. Nótese que algunas veces se utiliza σ y otras $\Delta\sigma$, y que el lector deberá mirar detenidamente el contexto de la discusión para determinar su significado.

A, B = coeficientes de presión de poros (o parámetros)

De la simple inspección de la ec. (16-4), se puede determinar el coeficiente B aplicando un esfuerzo a una muestra en una cámara triaxial de σ_3 (o $\Delta\sigma_3$) y midiendo la presión de poros resultante. En suelos saturados, B debe estar entre 0.98 y 1.00; puede ser ligeramente menor que 1.00 debido a limitaciones e inexactitudes inherentes al ensayo. Con el coeficiente B establecido, la aplicación adicional de un esfuerzo desviador permitirá la evaluación del coeficiente A .

El incremento en presión de poros u debido a la aplicación de σ_3 y el esfuerzo desviador $\sigma_1 - \sigma_3$ puede utilizarse en la ec. (16-3) para obtener σ' o estimar en el terreno los incrementos de presión de poros para, por ejemplo, construcción de terraplenes para presas, diques, carreteras, etc. Realmente, para suelos con $S < 100\%$, la evaluación de los parámetros ϕ y c será cuestionable utilizando las ecuaciones (16-4) y (16-3) ya que es obvio que la distribución de presión de poros a lo largo del plano de falla en la muestra de suelo puede no ser uniforme. Esto se ha validado también en varios proyectos de construcción donde se instalaron piezómetros para medir y comparar la presión de poros de diseño con la presión de poros desarrollada en el terreno. Esta limitación de ensayo es similar a la de los ensayos de permeabilidad — sin ella, no se tiene la menor idea de cual podrá ser la presión de poros; con ella se tiene alguna base sobre la cual ejecutar un diseño.

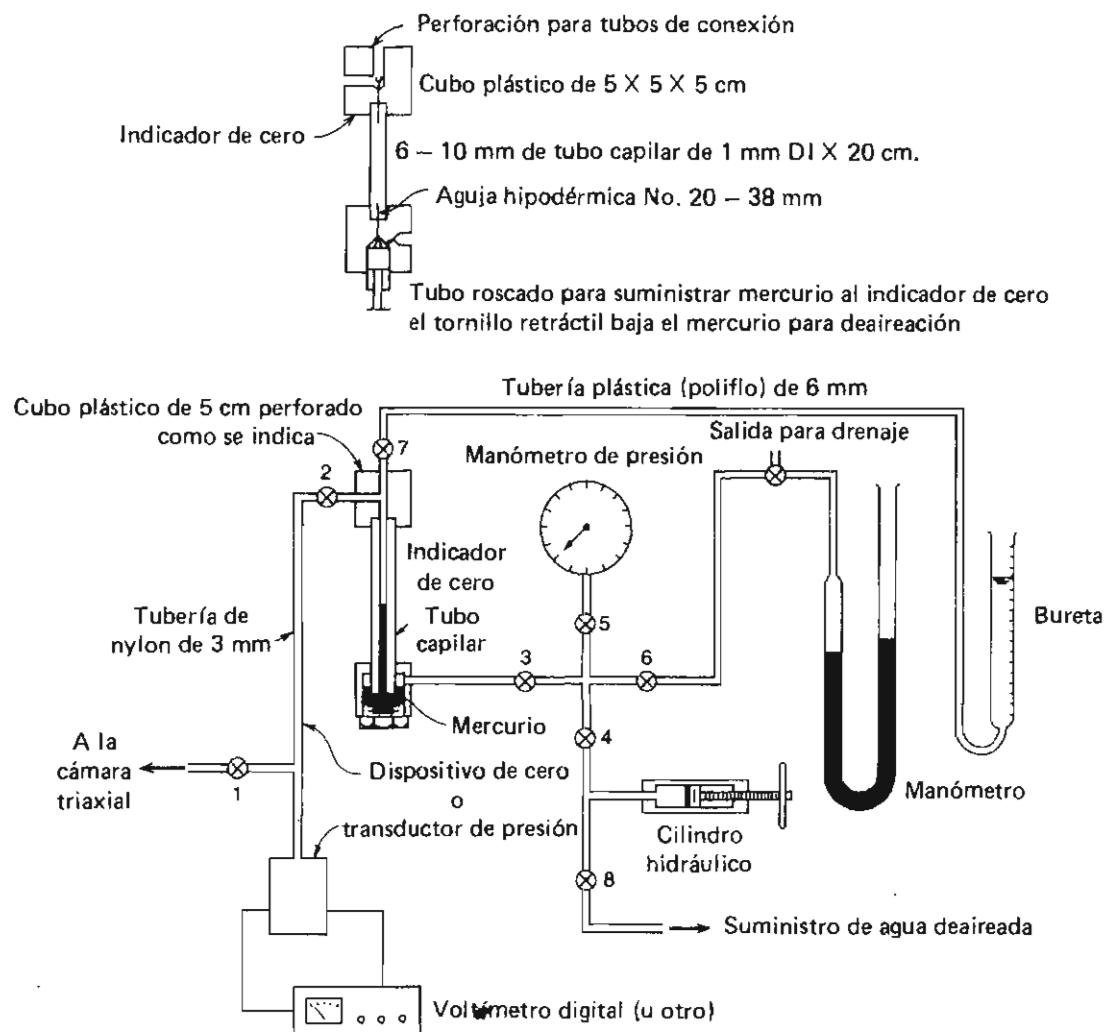
Para suelos de $S = 100\%$, el uso de la ec. (16-4) producirá resultados mucho más confiables. Realmente, la ec. (16-4) es más útil en el laboratorio que en otro sentido (para ensayo saturado); o sea, se puede detectar si una muestra está saturada aplicando una presión lateral en varios incrementos y calculando el coeficiente B . Si los valores obtenidos varían entre 0.98 y algo ligeramente por encima de 1.00, se puede suponer que la muestra se encuentra realmente saturada.

La medición de la presión de poros puede lograrse con dos técnicas básicas:

1. Conectando un transductor de presión a la línea de saturación¹ y, a su vez, conectando la

¹ Algunos laboratorios han utilizado el método de insertar una aguja larga dentro de la muestra a la profundidad que se espera esté aproximadamente el plano de la falla. La aguja se conecta a continuación a una línea dentro de la cámara de presión de forma que se pueda conectar a un equipo de medición de presiones. Hay tres buenas razones para no recomendar este procedimiento:

- a. Es necesario aplicar un parche de neumático de carro para lograr que la junta de entrada de la aguja sea impermeable; esto requiere un ingenio considerable.
- b. La superficie de falla no es a menudo previsible.
- c. La muestra a menudo se altera por la introducción de la aguja la cual debe ser mínimo de 3 mm ($\frac{1}{8}$ de pulgada) de diámetro para poder insertarla sin que los pequeños granos de suelo puedan taponarla e inutilizarla.

**Figura 16-2**

Detalles del circuito de medición de presión de poros. Perforar huecos de conexión en el indicador de ceros de forma que una pequeña inclinación permita flotar hacia afuera las burbujas. Todos los tubos deben saturarse de antemano (usar agua destilada, deaireada).

salida del transductor a un voltímetro digital (o de otro tipo). Es posible obtener transductores de presión que con muy pequeño desplazamiento volumétrico activan su capacidad completa. Este requerimiento es esencial si se quieren tomar lecturas válidas de la presión de los poros.

2. Utilizando algún dispositivo indicador de presión cero (del tipo mostrado en la Fig. 16-1 y esquematizado en la Fig. 16-2). Estos dispositivos se pueden conseguir en el comercio, pero si se construye uno en el laboratorio se podrá conocer (a) cómo funciona y (b) cuáles son sus limitaciones. Un aparato similar al de la Fig. 16-2 puede hacerse a un costo nominal (dependiendo de quién pague el trabajo de maquinado o de quién hace el trabajo requerido de maquinado.) A continuación se presenta una lista de partes esenciales:

8 válvulas (de paso y cierre sin permitir desplazamiento de volumen en las operaciones de apertura/cierre)

1 manómetro de presión (de 20 cm de diámetro X 5 a 7 kg/cm², de rango con sensibilidad de 0.05 kg/cm² /división)

1 cilindro hidráulico con control de tornillo (fabricado en el taller), de 100 ml de capacidad

1 tubo de vidrio en U para hacer un manómetro que permita registrar presiones de poros negativas

1 bureta (100 ml) para medir cambios de volumen

1 indicador de cero (construido en el taller), consulte la Fig. 16-2 para los detalles de montaje:

2 piezas de plástico de $5 \times 5 \times 5$ cm en referencia a la Fig. 16-1 para ser perforados y taponados

1 pieza de tubo capilar de 1 mm de diámetro interno por 6 a 10 mm de diámetro externo y 20 cm de longitud

2 agujas hipodérmicas No. 20 de 38 mm de longitud (de acero inoxidable)

1 varilla plástica roscada (usar rosca conveniente) de unos 10 cm de longitud con rosca en 6 cm de longitud de varilla por lo menos

1 escala métrica para observar y calibrar la columna de mercurio

$\frac{1}{2}$ kg de mercurio para el indicador de cero y el manómetro (tubo U)

Tubería de nylon en 3 mm \times 3 m de longitud (utilizar nylon para resistir altas presiones sin expansión).

Tubería plástica normal de 6 mm \times 3 m para sitios donde la expansión no sea crítica.

Surtido suficiente de racores con entradas patrón para tubería de 3 y 6 mm ($\frac{1}{8}$ y $\frac{1}{4}$ de pulgada). Verificar que se utilicen uniones de nylon donde exista algún tipo de posibilidad de contaminación por mercurio o el equipo tendrá una vida extremadamente corta.

El sistema de indicador de cero funciona de la siguiente forma (véase la Fig. 16-2):

1. Deairear el sistema y estabilizar el mercurio en el indicador de cero.

2. Conectar la tubería de nylon de 3 mm (precargada con agua) a la tubería de salida de la muestra.

3. Cerrar todas las válvulas. Aplicar la presión de cámara σ_3 . A continuación abrir las válvulas numeradas 1, 2, 3, 4 y 5 del esquema dibujado.

4. Si la muestra está saturada, el mercurio inmediatamente caerá en el indicador de cero debido a la presión de la cámara; añadir agua al sistema con el cilindro hidráulico para traer la columna de mercurio en el indicador de cero de regreso a su posición inicial. La presión necesaria para hacerlo se puede leer en la carátula del manómetro de presión y debería ser muy parecida a σ_3 de la cámara.

5. Aplicar el esfuerzo desviador y controlar visualmente la columna de mercurio en su posición inicial utilizando el cilindro hidráulico. Registrar las lecturas del manómetro de presión al tiempo con el esfuerzo desviador y las lecturas de deformación en los formatos adecuados.

La inspección de los diagramas de tubería de las Figs. 16-1 ó 16-2 indican que pueden utilizarse los cambios de volumen para determinar el fin de la consolidación en ensayos consolidados o (si no se toman las presiones de poros) medir el cambio de volumen de la muestra bajo la aplicación de la carga (con válvula 1, 2 y 7 abiertas).

Si se conoce por adelantado que la estructura del suelo sufrirá un colapso durante la aplicación de la carga desviadora, se puede conectar la salida de la muestra al manómetro de mercurio (tubo en U con válvulas 1, 2, 3 y 6 abiertas) para medir presiones de poros negativas. Si la muestra sufre un colapso de otra forma, el operador necesitará aplicar vacío con el cilindro hidráulico (y no registrar en el manómetro) para prevenir que el mercurio del indicador de cero sea halado hacia el lado de la muestra en el sistema.

Si se desea medir las presiones de poros y los cambios volumétricos simultáneamente, o medir los cambios volumétricos que ocurren en una muestra no saturada, es necesario hacer modificaciones al ensayo:

1. Será necesario utilizar un líquido para establecer la presión de cámara, σ_3 . Llenando la cámara con un líquido (tal como una mezcla agua-glicerina) y controlando el fluido que entra o sale de la cámara durante el ensayo, con tolerancia suficiente para tener en cuenta el avance del pistón dentro de la cámara, es posible calcular los cambios de volumen.

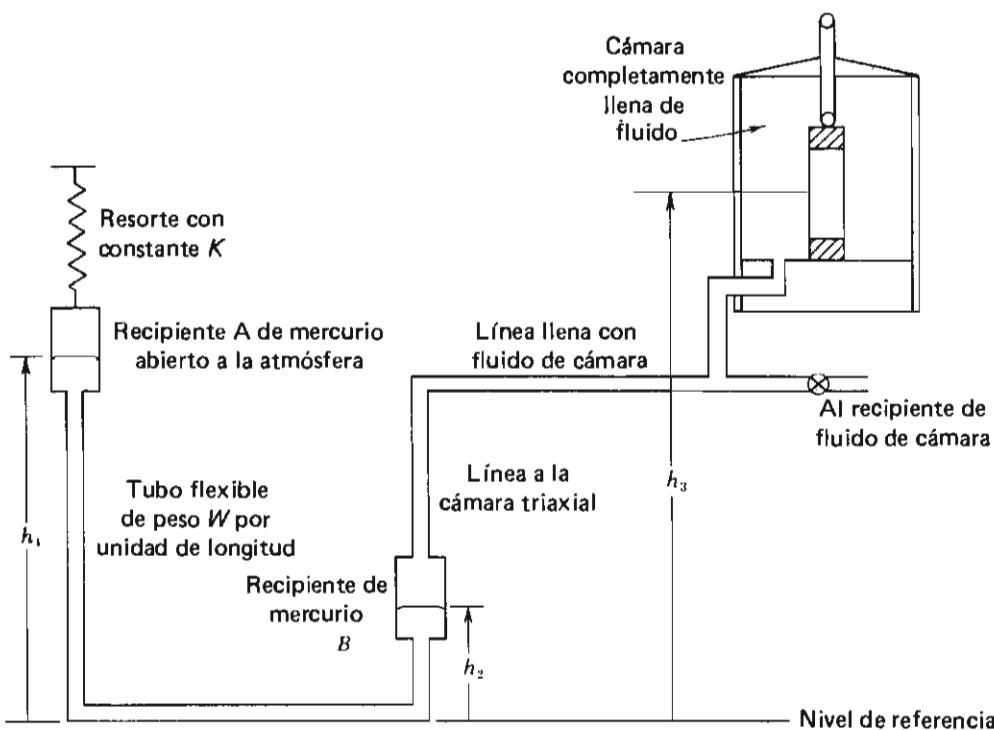


Figura 16-3

Esquema del aparato compensador para medir el cambio de volumen en muestras no saturadas durante el ensayo triaxial. Nótese la necesidad de dejar tolerancia para el avance del pistón dentro de la cámara.

Lubricar el pistón de carga con grasa de silicona (válvula de paso) para reducir la filtración de la cámara.

2. Usar un dispositivo compensador de algún tipo para mantener la presión de la cámara constante cuando se produzca flujo hacia adentro o hacia afuera de la cámara. La Fig. 16-3 ilustra los detalles de las líneas descritas por Bishop y Henkel (1962). Los principios de este aparato se describen en los siguientes párrafos.

Con respecto al nivel de referencia mostrado (Fig. 16-3) pueden obtenerse fácilmente las tres cabezas de energía h_1 , h_2 y h_3 . Las cabezas de energía h_1 y h_2 son las localizaciones diferenciales de las dos cabezas de mercurio conectadas por un tubo flexible de nylon tal como el de 6 mm de diámetro externo antes mencionado. La parte superior del recipiente de mercurio B referenciado por la cabeza h_2 , se encuentra en contacto con el fluido de la cámara y la presión de la misma σ_3 , a través de la conexión en T a la cámara. El otro lado de la conexión en T se conecta al suministro de fluido para la cámara. Con esta configuración, la presión de la cámara se puede mantener por la diferencia entre las cabezas h_1 y h_2 , o en forma de ecuación

$$\sigma_3 = (h_1 - h_2)\gamma_m \quad (a)$$

donde γ_m = peso unitario del mercurio. Ahora, si la muestra que se encuentra dentro de la membrana cambia de volumen (por ejemplo, se reduce) la presión de la cámara decrece y el mercurio que se encuentra a una altura h_2 (en el recipiente B) se eleva una cantidad Δh . Esto cambiará el valor de $h_1 - h_2$ por Δh y si nada se hace para compensarlo, la presión de la cámara se volverá

$$\sigma_3 = (h_1 - h_2 - \Delta h)\gamma_m \quad (b)$$

Como se desea mantener σ_3 = constante (ojalá con una precisión de $\pm 0.01 \text{ kg/cm}^2$ o menos), algo debe hacerse en el sistema para compensar el cambio de volumen Δh descrito. Lo que puede hacerse es colocar el recipiente de mercurio (A en la Fig. 16-3) de altura h_1

colgando de un soporte. Así, cuando h_2 suba, parte del mercurio sale del recipiente A disminuyendo de esa forma su peso, y produciendo un acortamiento en el resorte. Si la constante K del resorte tiene un valor apropiado, el acortamiento del resorte será suficiente para balancear exactamente el sistema de presiones contra el cambio Δh causado por el nivel de referencia de mercurio h_2 .

La constante del resorte puede evaluarse como sigue:

El cambio en el peso del recipiente A debido a Δh en B es:

$$\Delta W = \gamma_m A_B \Delta h \quad (c)$$

donde A_B es el área del recipiente B (por conveniencia, el recipiente A debería tener la misma sección transversal). El cambio neto de peso debe incluir una pequeña longitud del tubo que conecta los recipientes A y B, que a su vez debe ser levantado cuando el resorte se comprima una cantidad de $(\Delta L)W$; por consiguiente, el peso neto será:

$$\Delta W_{\text{net}} = \gamma_m A_B \Delta h - (\Delta L)W \quad (d)$$

La constante de resorte multiplicada por ΔL será también igual al cambio neto de peso, o

$$K \Delta L = A_B \gamma_m \Delta h - (\Delta L)W \quad (e)$$

ó

$$K = \frac{A_B \gamma_m \Delta h}{\Delta L} - W \quad (f)$$

Para obtener una expresión para ΔL , considerar los siguientes:

Si los cilindros A y B tienen el mismo diámetro (o tamaño),

$$\Delta h_2 = -\Delta H_1 = \Delta h$$

y si ambos cilindros (A y B) son estacionarios, el cambio en la presión será:

$$\sigma_3 + \Delta \sigma_3 = (h_1 - \Delta h - h_2 - \Delta h) \gamma_m + (h_2 + \Delta h - h_3) \gamma_w$$

Pero σ_3 puede obtenerse escribiendo una ecuación típica para un manómetro con líquido estacionario para el sistema:

$$\sigma_3 = (h_1 - h_2) \gamma_m + (h_2 - h_3) \gamma_w$$

de la cual

$$\Delta \sigma_3 = -(2\gamma_m - \gamma_w) \Delta h \quad (g)$$

Ahora, si se eleva el cilindro A una longitud ΔL ,

$$\sigma_3 + \Delta \sigma_3 = (h_1 + \Delta L - \Delta h - h_2 - \Delta h) \gamma_m + (h_2 + \Delta h - h_3) \gamma_w$$

ó

$$\Delta \sigma_3 = \Delta L \gamma_m - (2\gamma_m - \gamma_w) \Delta h \quad (h)$$

y si $\Delta \sigma_3 = 0$,

$$\Delta L \gamma_m - (2\gamma_m - \gamma_w) \Delta h = 0$$

y la expresión deseada para ΔL se vuelve:

$$\Delta L = \left(2 - \frac{\gamma_w}{\gamma_m} \right) \Delta h \quad (i)$$

Sustituyendo este valor en E (f) se obtiene la expresión deseada para la constante del resorte:

$$K = \frac{A_B \gamma_m}{2 - \gamma_w/\gamma_m} - W \quad (16-4)$$

donde A_B = área de los cilindros A y B

γ_m = peso específico del mercurio = 13.53 g/cm^3

- γ_w = peso específico del fluido de la cámara
 W = peso por unidad de longitud del tubo flexible que conecta los recipientes A y B . (Este peso es cercano a 0.001 kg/mm para tubería plástica de 6 mm de diámetro externo, y por consiguiente puede despreciarse para cualquier propósito práctico).
 K = constante deseada para el resorte (fuerza/longitud)

Ejemplo

Sea $A = B = 5.08 \text{ cm}$; por tanto, el área = 20.3 cm^2

Fluido de la cámara = mezcla agua-glicerina de $\gamma_w = 0.9 \text{ g/cm}^3$

Sustituyendo en la ecuación (16-4) se obtiene:

$$K = \frac{(20.3)(13.53)}{2 - 0.9/13.53} = 142 \text{ g/cm}$$

La Fig. 16-4 puede utilizarse para evaluar cualitativamente los méritos de los ensayos drenados y no drenados sobre muestras de suelos cohesivos y no cohesivos.

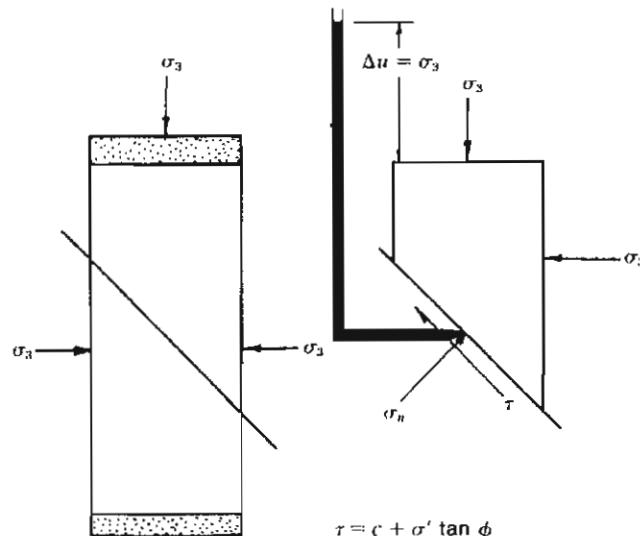


Figura 16-4

Efectos de la presión de poros durante un ensayo no-drenado. Es evidente que un ensayo no-drenado sobre un suelo no-cohesivo sólo puede medir la resistencia al corte de la membrana triaxial.

$$\begin{aligned} \tau &= c + \sigma' \tan \phi \\ \text{Si } \Delta u &= \sigma_3; \sigma' = 0 \\ \Delta u &= \sigma_3 + \Delta \sigma; \sigma' = 0 \\ \therefore \tau &= c \quad \text{para suelos cohesivos} \\ \tau &= 0 \quad \text{para suelos no cohesivos} \\ \text{Si } \Delta u &\neq \sigma_3, \\ \text{entonces } \tau &= c + \sigma' \tan \phi \end{aligned}$$

Procedimiento

A. SUELO NO COHESIVO¹

- Montar una membrana de caucho de diámetro apropiado (mínimo de 5 cm de diámetro para arena²) sobre el cabezote o placa de base (referirse a la Fig. 15-2), que se ha atornillado con anterioridad a la base de la cámara, utilizando una banda de caucho o sellos de aro para hacer el ajuste. Si se desea proveer una junta más impermeable, debería recubrirse la superficie lateral de la placa de base con grasa de silicona para mejorar el sello entre la placa y la membrana.

¹ En sesiones de laboratorio de demostración para estudiantes debería utilizarse arenas muy limpias de forma que las presiones de poros medidas y la consolidación, etc. sea rápida.

² El tamaño máximo de partícula debería ser menor que $\frac{1}{6}$ del diámetro de la muestra ensayada.

Algunas personas miden el espesor de la pared de la membrana de caucho antes de montarla, para poder hacer el ajuste correspondiente en el área cuando necesiten determinar el área inicial de la muestra, pero para cálculos ordinarios (en opinión del autor) esto introduce una precisión ficticia en los resultados.

Colocar una piedra porosa sobre la placa de base. Para los ensayos de esta sección, la piedra porosa debe estar saturada. Se recomienda hervir las dos piedras porosas en agua destilada para incrementar el grado de saturación. El simple almacenamiento de las piedras sumergidas en agua aún por un período de tiempo muy largo, podría ser insuficiente para alcanzar el grado de deaireación y saturación deseado.

2. Pesar un recipiente de arena seca de forma que se pueda establecer la densidad de la muestra y se pueda duplicar aproximadamente en ensayos posteriores. Nótese que para obtener una densidad dada será necesario mezclar el suelo con una cantidad conocida de agua con el fin de producirle un contenido de humedad específico. El suelo granular húmedo puede compactarse hasta un límite dado — mientras que el material seco es casi imposible de compactar.
3. Colocar el molde para hacer la muestra alrededor de una membrana de caucho y doblar la parte superior de la membrana por encima del borde del molde hacia abajo. No debe doblarse la membrana, sin embargo, si el molde es tan grande que exista el peligro de rasgar la membrana en el proceso. Es posible utilizar también expansores de membranas en la preparación de la muestra si se dispone del diámetro correcto. Si existe un expensor de tipo cilindro dividido, que pueda conectarse también a una línea de vacío, puede ser necesario poner un poco de grasa de silicona a lo largo de la junta para garantizar el efecto del vacío. Si se utiliza cualquiera de estos tipos de expansores con la ayuda de vacío, podría también ser útil colocar bandas de papel de filtro o de algodón entre la membrana y la pared interna del expensor de forma que el vacío sea efectivo en toda la altura del expensor de la membrana.
4. a. Deairear el agua en el recipiente de saturación conectándolo de 5 a 10 min a la línea de vacío.
b. Abrir la válvula de saturación y permitir el flujo de agua hacia el fondo de la membrana por una profundidad de 2 cm; cerrar inmediatamente la válvula.
c. Colocar arena a través del agua en el fondo de la membrana utilizando un compactador para obtener la densidad deseada hasta exactamente la profundidad bajo la superficie del agua.
d. Abrir la válvula de saturación y permitir otros 2 cm adicionales de agua entre la membrana; añadir nuevamente arena; repetir estas operaciones hasta que se complete el molde. Utilizar una pipeta y remover el exceso de agua que pueda permanecer.
e. Colocar la piedra porosa saturada en la parte superior de la muestra.
5. Colocar el cabezote superior o placa superior sobre la piedra porosa. Es posible que se necesite recubrir el perímetro de dicha placa con grasa de silicona para mejorar el sellado. Desenrollar la membrana fuera del molde y sobre la placa superior y sellar a la placa con bandas de caucho rígido o sellos de aro. Utilizar un pequeño nivel para chequear la horizontalidad de la placa superior.
6. Conectar el tubo de la placa o cabezote superior a la línea de vacío en la base de la cámara y aplicar un vacío 150 a 200 mm de mercurio. Simultáneamente abrir la línea de saturación (de forma que no se vaya a disminuir la saturación de la muestra —observar si aparece más agua saliendo de la muestra que entrando hacia la muestra; si es así reducir el vacío—). Cerrar la línea de saturación.
7. A continuación remover el molde de la muestra y examinar que no haya agujeros en la membrana ni filtraciones evidentes. Si se encuentra alguna, la muestra debe volverse a compactar usando una nueva membrana.
8. Obtener cuatro mediciones de la altura separadas 90° aproximadamente y utilizar el valor promedio como el valor de la altura inicial de la muestra L_0 . Tomar dos lecturas del diámetro separadas 90° en la parte superior, la mitad, y en la base de la muestra utilizando 2 calibradores. Tomar estas medidas con una precisión de 1 mm. Calcular el diámetro

promedio para la muestra a cada altura y calcular un diámetro promedio final de la siguiente forma:

$$d_{av} = \frac{d_t + 2d_m + d_b}{4}$$

donde d_t es el diámetro promedio basado en las dos medidas superiores, etc. Calcular el valor correspondiente al área inicial de la muestra A_0 utilizando el diámetro promedio recién calculado.

9. Colocar el cilindro de lucita sobre la base de la cámara, asegurándose que no haya granos en la base de manera que se pueda lograr un sellamiento completamente hermético. Colocar la cámara en la máquina de compresión y desplazarla hasta que se produzca un ligero contacto del pistón de carga y la barra de carga (o cruceta de la máquina de compresión).
10. Aplicar una presión lateral predeterminada (preferiblemente en múltiplos de 10 kPa o 0.5 kg/cm² para facilitar los cálculos) utilizando aire comprimido u otro fluido (tal como una mezcla de agua y glicerina) y reducir simultáneamente el vacío en el interior de la muestra a cero. De paso, es bueno decir que en ensayos de larga duración la membrana de caucho permitirá eventualmente filtraciones independientemente del tipo de fluido utilizado en la cámara. Estas filtraciones pueden reducirse utilizando mezcla de agua con glicerina como fluido de cámara y dos membranas con grasa de silicona entre ellas rodeando la muestra.
11. Si se desea medir el cambio de volumen para detectar el final de la consolidación, se debe conectar la línea de saturación a la bureta de cambio de volumen. Hacer una gráfica de cambio de volumen contra el tiempo permite determinar cuándo se ha casi completado la consolidación. El final aproximado de la consolidación puede obtenerse controlando el deformímetro de flexión y cuando la muestra termine de acortarse, la consolidación deberá estar muy cerca de su culminación.
12. Tan pronto se termina la consolidación, conectar el indicador de cero de la presión de poros¹ a la válvula de salida de la línea de saturación y observar la posición estacionaria del indicador de cero.
13. Cuando se aplicó la presión a la cámara, se pudo observar que el indicador de carga señalaba una fuerza hacia arriba debida a la diferencia entre el peso de la varilla del pistón y la fuerza que hace la presión de la cámara al actuar sobre la base del pistón. Ajustar cuidadosamente la cámara triaxial hasta que se produzca nuevamente el contacto entre el pistón y el cabezote en la parte superior de la muestra y en este momento regresar o volver a cuadrar el cero en el indicador de carga (deformímetro de carga). Este paso permite la lectura directa de la carga desviadora y unos cálculos mucho más sencillos.
- En este momento debe abrirse la otra línea de salida de la muestra si se piensa hacer un ensayo "drenado".
14. Colocar el deformímetro de carátula (con precisión de 0.01 mm por división) a la máquina de forma que se pueda obtener la deformación de la muestra. Cuadrar el deformímetro en cero; comprimir manualmente y soltar varias veces el pistón, observar la lectura de cero y reajustar el cero si es necesario. Verificar nuevamente la lectura de cero en el deformímetro de carga. Verificar el manómetro de presión de la cámara. Verificar el indicador de cero.
15. Fijar el control de la máquina de compresión a la tasa de deformación unitaria deseada (entre 0.5 y 1.25 mm/min, como haya sido especificado por el instructor).
16. Accionar la máquina de compresión y tomar lecturas simultáneas del deformímetro de carga y el deformímetro de desplazamiento y de la lectura de presión de poros en el ma-

¹ Si se desea determinar si la saturación es 100% antes de conectar la muestra a la bureta de cambio de volumen conectarla directamente al indicador cero utilizando un σ_3 menor que el valor del ensayo. A continuación incrementar σ_3 lentamente y registrar las presiones de poros resultantes. Calcular el coeficiente B y si está muy cercano a 1.00, la muestra puede suponerse completamente saturada.

nómetro de presión de poros. Recordar mantener el manómetro de presión de poros activado observando el indicador de cero y añadiendo agua a través del cilindro hidráulico para mantener la columna de mercurio en su posición inicial.

En general, para muestras entre 63 y 100 mm de diámetro, se pueden tomar lecturas de deformación cada 0.5 mm de deformación (50 divisiones del deformímetro de 0.01 mm de rango). Tomar lecturas hasta que la carga se mantenga constante y luego caiga o hasta ligeramente después de alcanzar un 20% estimado de deformación unitaria. Si esto produce un número demasiado grande de lecturas de carga-deformación, hacer los cálculos (ver Procedimiento C) sobre suficientes lecturas, para definir adecuadamente la curva de esfuerzo-deformación y su valor pico. Estar seguros de controlar el manómetro de presión de la cámara durante todo el ensayo, y no permitir la variación en la presión de la cámara en más de 0.05 kg/cm².

17. Después de fallar la muestra, apagar y/o devolver la máquina de compresión, remover la carga sobre la muestra, y liberar gradualmente la presión de cámara de forma que el indicador de cero no pierda mercurio.
18. Quitar el cilindro de lucita y la muestra ensayada. Preparar un nuevo espécimen a la misma densidad aproximada (dentro de un rango de 0.2 a 0.4 kN/m³) y hacer dos ensayos adicionales. Esto completa el trabajo de laboratorio para un suelo no cohesivo; consulte el procedimiento C para completar el informe.

B. SUELO COHESIVO

1. Preparar dos o tres muestras de tubo con relaciones L/d adecuadas entre 2.2 y 2.5. Es posible tener que utilizar un aparato para moldear las muestras en caso de necesitarlas de un diámetro inferior al diámetro de las muestras de tubo.

En forma alternativa, se pueden compactar tres o cuatro muestras a un contenido de humedad dado con un esfuerzo de compactación determinado utilizando el aparato de compactación Harvard miniatura. Este procedimiento permite moldear muestras de aproximadamente 36 mm de diámetro. Estas muestras posiblemente no están saturadas; sin embargo, y como se desea trabajar con muestras saturadas, podría ser necesario la utilización de muestras de tubo.

2. Para las muestras que han sido preparadas, obtener cuatro mediciones de altura separadas 90° aproximadamente y utilizar el valor promedio como altura inicial de la muestra L_0 . Tomar dos lecturas de diámetro separadas 90° en la parte superior, a media altura, y en la base de la muestra utilizando dos calibradores. Tomar estas medidas con una precisión de 1 mm. Calcular el diámetro promedio de la muestra en cada localización y calcular el promedio global de la muestra como:

$$d_{av} = \frac{d_t + 2d_m + d_b}{4}$$

donde d_t es el diámetro promedio basado en las dos medidas superiores, etc. Calcular el valor correspondiente del área inicial de la muestra A_0 utilizando el d_{av} de la ecuación anterior.

3. Utilizar el expulsor de membrana y la membrana adecuados para el tamaño de la muestra e introducir la membrana suavemente dentro del expulsor, doblando los extremos de la membrana sobre los bordes del expulsor. Si no hay filtraciones, la membrana formará una piel suave en la parte inferior del expulsor cuando se le aplique vacío. Puede ser necesario colocar pequeñas tiras de papel de filtro entre la membrana y las paredes del expulsor para lograr una eficiencia mayor en el vacío cuando se esté expandiendo la membrana antes del paso siguiente.
4. Dependiendo de la muestra, lubricar ligeramente la membrana con vaselina de petróleo, empollarla con polvo de teflón (sustancia inerte) o como último recurso, humedecerla con agua para facilitar la colocación de la muestra dentro de la membrana.
5. Cortar tiras delgadas de papel de filtro (por lo menos cuatro) suficientemente largas para fijarlas bajo la piedra porosa correspondiente al cabezote inferior y extenderla por enci-

ma del expansor de la membrana cuando se haya colocado hasta la plataforma o cabezote inferior. Doblar las tiras sobre la membrana de caucho y ajustar las inferiores con una banda rígida de caucho o similar. Asegurarse de que la piedra porosa se encuentre saturada.

Insertar la muestra dentro de la membrana y asentirla sobre la piedra porosa inferior. Soltar el vacío de la membrana y desenrollar la parte inferior hacia la membrana y sellarla con las bandas rígidas de caucho correspondientes. Engrasar con silicona el perímetro de la plataforma si se necesita mejorar el sellamiento en ese punto. Colocar la piedra porosa superior saturada, doblar las tiras de papel de filtro entre la piedra porosa y la base o cabezote superior, y a continuación sentar dicho cabezote. Utilizar el mismo procedimiento seguido para el cabezote inferior.

6. Conectar la línea del cabezote superior a la línea de vacío sin aplicar vacío todavía. Saturar todas las líneas que entren o salgan de la muestra; a continuación cerrar la línea de la plataforma superior. Conectar la línea de saturación al indicador de cero de la presión de poros.
7. Colocar la cápsula de lucita en la cámara y montar la cámara en la máquina de compresión. Traer a contacto la varilla de carga con el pistón de carga hasta que el deformímetro de carga enseñe una pequeña cantidad de carga.
8. Aplicar parte del incremento de carga de cámara de σ_3 , y observar la presión de poros. Hacer esto por lo menos dos veces y calcular el coeficiente B para determinar si la muestra se encuentra saturada. Si es necesario observar el cambio de volumen (también recomendado si se va a efectuar un ensayo de consolidación), desconectar el indicador de cero y conectar la bureta de cambio de volumen.
9. Aplicar el valor total de σ_3 , y observar el cambio de volumen en la bureta. Hacer una curva de cambio de volumen contra tiempo transcurrido. Cuando el gráfico semilogarítmico se parezca al del ensayo de consolidación (experimento No. 13), la consolidación de la muestra puede suponerse concluida. A continuación reconectar el indicador de cero. Nótese que el propósito de las tiras de papel de filtro es aligerar el proceso de consolidación.

A partir de este punto, consulte los pasos 13 a 18 del procedimiento A y todo el procedimiento C pues el trabajo es idéntico.

C. CALCULOS

1. Calcular la deformación unitaria a partir de las lecturas de deformación como:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o}$$

y colocar los datos en la columna adecuada del formato. Calcular también el área corregida:

$$A' = \frac{A_o}{1 - \epsilon}$$

y colocar dichos datos en la hoja de formato correspondiente.

2. Calcular la carga desviadora utilizando las lecturas del deformímetro de carga. Si se utilizó anillo de carga, la carga desviadora es:

$$P = \text{lectura del deformímetro de carga} \times \text{constante del anillo de carga}$$

donde la lectura del deformímetro de carga se toma en unidades de deflexión. Registrar estos datos en la columna adecuada del formato.

3. Calcular el esfuerzo desviador:

$$\sigma = \frac{P}{A'}$$

y llenar los datos en la columna apropiada del formato.

4. Dibujar una curva de esfuerzo desviador contra deformación unitaria, (sobre el eje de abscisas) y obtener el esfuerzo en el punto pico a menos que el esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria del 20% ocurra primero. Mostrar este valor para el esfuerzo desviador en la gráfica. Dibujar todos los ensayos sobre la misma gráfica, identificando cada curva por medio de su presión lateral correspondiente.
5. Con el esfuerzo desviador máximo del paso 4, calcular el esfuerzo principal mayor del ensayo como:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma$$

Calcular además la presión de poros correspondiente al máximo esfuerzo desviador de la gráfica esfuerzo desviador contra presión de poros. Calcular la presión intergranular o presión efectiva σ'_3 , y el esfuerzo principal mayor efectivo, σ'_1 como:

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad \sigma'_1 = \sigma_1 - u$$

6. Dibujar los círculos de Mohr para los estados de esfuerzos principales tanto *total* como *efectivo* sobre el mismo par de ejes para todos los ensayos. Dibujar una tangente común (envolvente de esfuerzos) a cada conjunto de círculos y medir la pendiente de dicha recta para obtener de esa forma los ángulos aparente y "verdadero" de fricción interna y los dos valores de la cohesión del suelo. Si el ensayo se ha hecho sobre suelos no cohesivos, la cohesión debería ser muy pequeña; Si no lo ha sido, discutir las razones para la divergencia. Asegurarse de mostrar todos los valores claramente identificados sobre la gráfica.
7. Calcular el ángulo de fricción interna aparente y "verdadero" ϕ para los ensayos de suelo no cohesivos utilizando la ec. (15-2) y comparar con los resultados obtenidos en el paso 6.
8. Mostrar mediante un dibujo muy claro el arreglo de equipo utilizando en el laboratorio como parte del informe independientemente del tipo de suelo ensayado.
9. Si se ensayaron suelos cohesivos, asegurarse de comentar en el informe y mostrar sobre la gráfica correspondiente a los círculos de Mohr el tipo de ensayo ejecutado (o sea ensayo CE, ensayo CU, ensayo U, etc.), y si el suelo estaba saturado o no.
10. Calcular el módulo tangente inicial y el módulo secante inicial utilizando el origen y el intercepto de la curva al 50% de la resistencia última y comparar dichos valores. Estimar la relación de Poisson utilizando los métodos del paso 12 del experimento inicial No. 15.

Experimento N° 17 **ENSAYO DE CORTE DIRECTO**

Referencias

ASTM D3080-72

ASCE (1960), Conferencia de Investigación Sobre Resistencia al Corte en Suelos Cohesivos, Boulder, Colorado.

ASTM (1964), Simposio Sobre Ensayos de Laboratorio para Esfuerzo Cortante en Suelos, *ASTM STP No. 361*.

ASTM (1952), Ensayo de Corte Directo en Suelos, *ASTM STP No. 131*.

Lee, K. L. (1970), Comparación de Ensayos Deformación Planas y Triaxiales sobre Arenas, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, SM-3*, Mayo pp. 901-923.

Objetivo

Familiarizar al estudiante con un procedimiento para determinación rápida de los parámetros de resistencia (ϕ y c) de un suelo.

Equipo

Aparato de corte directo (ver Fig. 17-1)

Calibrador

Nivel pequeño

Exposición general

El ensayo de corte directo impone sobre un suelo las condiciones idealizadas que se muestran en la Fig. 17-2. O sea, induce la ocurrencia de una falla a través de un plano de localización predeterminado. Sobre este plano actúan dos fuerzas (o esfuerzos) — un esfuerzo normal debido a una carga vertical P_v aplicada externamente y un esfuerzo cortante debido a la aplicación de una carga horizontal P_h . Estos esfuerzos se calculan simplemente como:

$$\sigma_n = \frac{P_v}{A} \quad (17-1)$$

$$\tau = \frac{P_h}{A} \quad (17-2)$$

donde A es el área nominal de la muestra (o de la caja de corte) y usualmente no se corrige para tener en cuenta el cambio de área causada por el desplazamiento lateral de la muestra P_h . Estos esfuerzos deberían satisfacer la ec. de Coulomb del experimento No. 15:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (15-1)$$

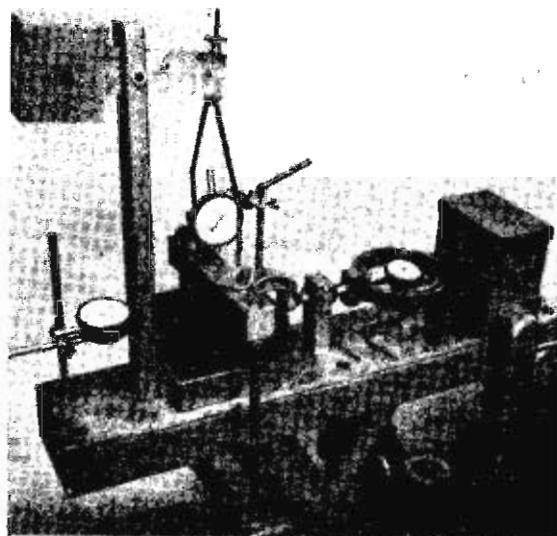
Como en la ec. (15-1) existen dos cantidades desconocidas (c y ϕ), se requiere obtener dos valores, como mínimo, de esfuerzo normal y esfuerzo cortante para obtener una solución.

Como el esfuerzo cortante τ y el esfuerzo normal σ_n tienen el mismo significado dado en la construcción del círculo de Mohr, en lugar de resolver una serie de ecuaciones simultáneas para c y $\tan \phi$, es posible dibujar en un plano de ejes coordenados los valores

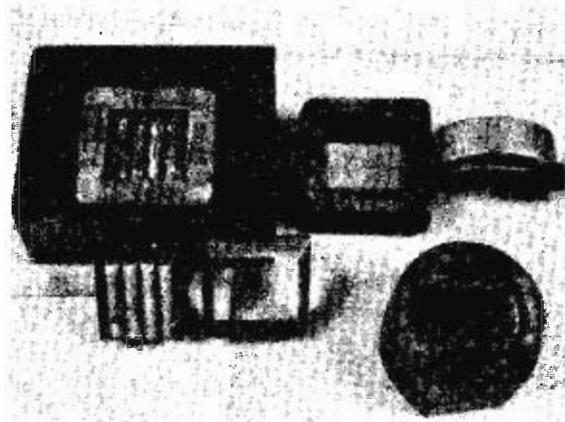
Figura 17-1

Equipo de corte directo.

(a) Máquina de corte directo que puede ser de operación manual o con motor (como la mostrada). Todas las máquinas son similares en detalles: anillo de carga y deformímetro de carga a la derecha. Deformímetro central vertical apoyado sobre el yunque de carga para medir consolidación/expansión durante el corte. El deformímetro de la izquierda mide la deformación cortante.



(b) Dos cajas de corte. Ambas —de tipo cuadrado o circular— se atornillan a la caja de saturación la cual es removible de la máquina [verla bajo el yunque de carga en (a)]. Nótese el uso de piedras porosas estriadas. La altura de la muestra se limita a 20 mm; el peso de la parte superior de la caja circular y del pistón circular mostrados es de 1778 g. Nótese que mediante el ajuste adecuado del contrapeso —ver el bloque acoplado al yunque vertical de carga en (a)— es posible producir la tara del equipo.



de τ contra σ_n para los diferentes ensayos (generalmente con τ como ordenada), dibujar una línea a través del lugar geométrico de los puntos resultantes, o del promedio del lugar geométrico de los puntos, y establecer la pendiente de la línea como el ángulo y el intercepto con el eje τ como la cohesión c . Así se consigue una solución gráfica de la ec. (15-1).

Para materiales no cohesivos, la cohesión debería ser cero por definición y la ec. (15-1) se convierte en:

$$\tau = \sigma_n \tan \phi \quad (17-3)$$

Las inexactitudes del ensayo y los efectos de tensión superficial de los materiales húmedos no cohesivos a menudo producen un valor de cohesión (aparente), que debería despreciarse a menos que sea más de 10 a 15 kPa. Si el valor de la cohesión es grande siendo el suelo un material no cohesivo, debería investigarse la razón para haber obtenido dicha cohesión.

El ensayo de corte directo fue originalmente muy popular. Sin embargo, a medida que avanza el estado del arte, se ha vuelto cada vez menos popular por las siguientes razones:

1. El área de la muestra cambia a medida que el ensayo progresá, sin que esto sea demasiado significativo ya que la mayoría de las muestras “fallan” a deformaciones muy bajas.
2. La superficie de falla real no es un plano, como se supuso o se intentó obtener con el tipo de caja de corte que se diseñó, ni tampoco se tiene una distribución uniforme del esfuerzo cortante a lo largo de la superficie de “falla” como también se supuso.
3. El ensayo usa una muestra muy pequeña, con el consiguiente resultado de que los errores de preparación son relativamente importantes.

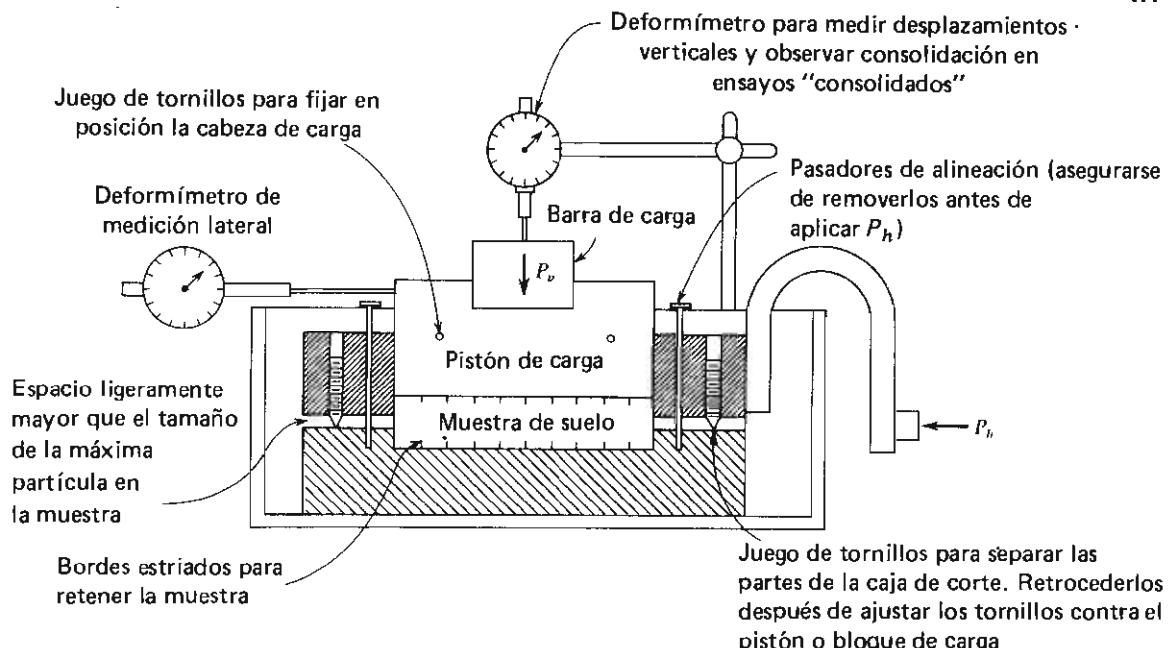


Figura 17-2

Detalles del ensayo y la caja de corte directo.

4. El tamaño de la muestra excluye la posibilidad de hacer mucha investigación de las condiciones de presión de poros durante el ensayo.
5. No es posible determinar el módulo de elasticidad ni el de la relación de Poisson.
6. Posteriormente se desarrolló el aparato para hacer el ensayo triaxial.

Sin embargo, con el avance posterior en el estado de arte, el ensayo de corte directo parece empezar a recuperar su popularidad inicial nuevamente, por las siguientes razones entre otras:

1. El ensayo triaxial es, relativamente, mucho más difícil de ejecutar e interpretar — especialmente si se toman medidas de presión de poros.
2. El tamaño de las muestras hace que efectuar ensayos consolidados-no drenados y consolidados drenados no requiera demasiado tiempo, pues el tiempo de drenaje es bastante corto aún para materiales con bajo coeficiente de permeabilidad, debido a que el camino de drenaje es muy pequeño.
3. Se ha introducido cajas con muestra cuadrada de forma que la reducción de área durante el ensayo puede fácilmente tenerse en cuenta si se desea. El uso de cajas cuadradas es relativamente reciente, y la mayoría de las máquinas antiguas todavía en servicio utilizan muestras de caja circular.
4. La máquina de corte directo es mucho más adaptable a los equipos electrónicos de medición, de forma que no se requiere la presencia continua de un operario para efectuar ensayos consolidados-drenados, que pueden durar varios días.
5. Se ha encontrado que los parámetros del suelo ϕ y c obtenidos por el método de corte directo son casi tan confiables como los valores triaxiales¹ (probablemente esto se debe más a problemas del operador que al hecho de que los equipos tengan igual capacidad de comportamiento). Lo anterior no quiere indicar que el ensayo triaxial sea indeseable; si no más bien que, si se desean únicamente los parámetros de suelos, los valores que brin-

¹ En arenas con ángulo de fricción interna por encima de 35° , los valores obtenidos en el ensayo de corte directo, pueden diferir entre 1° y 4° por encima de los obtenidos en el ensayo triaxial (ver Lee, 1979). Debajo de 35° , el valor de ϕ obtenido es casi el mismo en ambos ensayos.

da el ensayo de corte directo se han encontrado usualmente bastante aceptables. Y como ya se ha aclarado, hay alguna información como el comportamiento de presión de poros durante el corte, que no puede ser evaluado utilizando este ensayo de corte directo.

Los ensayos de corte directo pueden clasificarse como sigue:

1. *Ensayos no consolidados-no drenados o ensayos U.* El corte se inicia antes de consolidar la muestra bajo la carga normal P_v . Si el suelo es cohesivo, y saturado, se desarrollará exceso de presión de poros. Este ensayo es análogo al ensayo triaxial no consolidado-drenado.
2. *Ensayo consolidado-no drenado.* Se aplica la fuerza normal, y se observa el movimiento vertical del deformímetro hasta que pare el asentamiento antes de aplicar fuerza cortante. Este ensayo puede situarse entre los ensayos triaxiales consolidado-no drenado y consolidado-drenado.
3. *Ensayo consolidado-drenado.* La fuerza normal se aplica, y se demora la aplicación del corte hasta que se haya desarrollado todo el asentamiento; se aplica a continuación la fuerza cortante tan lento como sea posible para evitar el desarrollo de presiones de poros en la muestra. Este ensayo es análogo al ensayo triaxial consolidado-drenado.

Para suelos no cohesivos, estos tres ensayos dan el mismo resultado, esté la muestra saturada o no, y por supuesto, si la tasa de aplicación del corte no es demasiado rápida. Para materiales cohesivos, los parámetros de suelos están marcadamente influidos por el método de ensayo y por el grado de saturación, y por el hecho de que el material esté normalmente consolidado o sobreconsolidado. Generalmente, se obtienen para suelos sobreconsolidados dos conjuntos de parámetros de resistencia — un conjunto para ensayos hechos con cargas inferiores a la presión de preconsolidación y un segundo juego para cargas normales mayores que la presión de preconsolidación. Donde se sospeche la presencia de esfuerzo de preconsolidación en un suelo cohesivo sería aconsejable hacer seis o más ensayos para garantizar la obtención de los parámetros adecuados de resistencia al corte.

Procedimiento *Esta es una práctica de clase*

A. SUELO NO COHESIVO—TRABAJO DE LABORATORIO

1. Pesar un plato grande de arena seca (o mojada con el contenido de humedad conocido con exactitud) con suficiente material para hacer por lo menos tres ensayos a la misma densidad.
2. Ensamblar cuidadosamente la caja de corte (retroceder cualquier separación existente entre las partes de la caja y los tornillos de empalme) y fijar la caja en posición. Obtener la sección transversal A de la muestra.
3. Colocar cuidadosamente la arena en la caja de corte hasta cerca de 5 mm del borde de la superficie del anillo y colocar el pistón de carga (incluyendo la piedra porosa) sobre la superficie del suelo. Tomar un nivel pequeño y verificar la nivelación del pistón o bloque de carga.

Pesar el recipiente de la arena para determinar el peso exacto del material utilizado en la muestra. Obtener a continuación una referencia del espesor de la muestra de suelo marcando en varios puntos el borde del pistón o bloque de carga alrededor del perímetro con respecto a la altura de la caja de corte.

4. Aplicar la carga normal P_v deseada y colocar el dial para determinar el desplazamiento vertical (con precisión de 0.01 mm por división). Recordar incluir el peso del pistón de carga y la mitad superior de la caja de corte como parte del peso P_v .¹

Para ensayos consolidados, registrar en el dial el desplazamiento vertical y comenzar el ensayo, solo cuando el asentamiento ha parado. Para suelos no cohesivos esto puede hacerse a partir de la aplicación de P_v .

¹ Algunas cajas de corte (incluyendo la del autor) permiten tarar estos pesos junto con los del soporte colgante o yunque, de forma que el peso añadido sea directamente el peso normal efectivo.

5. Separar dos partes de la caja de corte desplazando los tornillos espaciadores que se encuentran en la parte superior de la caja de corte. El espacio desplazado debería ser ligeramente superior (al ojo) que el tamaño más grande de partículas presente en la muestra. A continuación se debe fijar el bloque de carga apretando los tornillos de fijación provistos para tal propósito a los lados de la parte superior de la caja de corte. Inmediatamente después separar los tornillos espaciadores de manera que se libere la parte inferior de la caja de corte; en este momento la carga normal, la mitad de la carga de la caja de corte, y el bloque o pistón de carga se encuentran actuando sobre la muestra de suelo.
6. Ajustar el deformímetro de carátula (0.01 mm/división) para medir el desplazamiento en cortante.
7. Para ensayos saturados, saturar la muestra llenando la caja de corte y permitiendo transcurrir suficiente tiempo para que tenga lugar la saturación.

Asegurarse de que las piedras porosas que se encuentran en la caja de corte estén saturadas si el suelo al ensayarse contiene alguna humedad.

8. Comenzar la carga horizontal (cortante) y tomar lecturas del deformímetro de carga, del deformímetro de desplazamiento cortante, y del deformímetro vertical (cambio de volumen). Si el ensayo es de tipo deformación unitaria controlada, se deben tomar esas lecturas a desplazamientos horizontales de:

5, 10, y cada 10 ó 20 unidades de desplazamiento horizontal

Utilizar una tasa de deformación unitaria del orden de 0.5 a no más de 2 mm/min. No utilizar tasas de deformación unitaria más rápidas, pues existe el peligro de que se presente el pico de carga cortante entre dos lecturas. La tasa de deformación unitaria debería ser tal que la muestra "falle" entre 3 y 5 min.

9. Retirar la arena de la caja de corte y repetir los pasos 1 a 8 sobre por lo menos dos muestras adicionales y a una densidad ojalá dentro de los 5 g y no más de 10 g respecto a la cantidad de suelo usada en el primer ensayo. Asegurarse de que la arena ocupe el mismo volumen utilizando las marcas de referencia del paso No. 3.

En el paso 4 usar un valor diferente de P_v para cada ensayo (se sugiere doblar la carga exterior, por ejemplo, 4, 8, 16 kg más el peso del bloque o pistón de carga para esos tres ensayos ó 5, 10, 20, kg, etc.).

B. SUELO COHESIVO—TRABAJO DE LABORATORIO

1. Moldear cuidadosamente tres o cuatro muestras al mismo tamaño (y, ojalá, a la misma densidad) tomadas de una muestra de bloque grande, o de una muestra de tubo, o de cualquier otro tipo de fuente. Utilizar un anillo cortante de manera que el tamaño pueda ser controlado bastante aproximadamente. Cualquier muestra con un peso apreciablemente diferente de las otras debe descartarse y en su lugar moldear otra muestra. [Qué constituye "apreciable" comparado con el tamaño de la muestra (del orden de 5 cm² × 20 a 25 mm de espesor) es asunto de criterio personal].

Nota: Se pueden necesitar seis muestras si el suelo está inalterado y preconsolidado. Mantener las muestras en ambiente de humedad controlada mientras se hace el moldeo, la preparación de la máquina de corte y los demás detalles del ensayo.

2. Retroceder la separación y el agarre de los tornillos guía en la parte superior de la caja de corte y ensamblar las dos partes. Asegurarse de que las piedras porosas están saturadas a menos que se vaya a ensayar un suelo seco.

Medir las dimensiones de la caja de corte para calcular el área de la muestra.

3. Colocar cuidadosamente la muestra dentro de la caja de corte. La muestra debe ajustar perfectamente en la caja y llenarla hasta cerca de 5 mm de la parte superior de la caja de corte.

Colocar el bloque o pistón de carga en su sitio sobre el suelo, la carga normal P_v y ajustar el deformímetro de carátula vertical.

Para un ensayo consolidado es necesario controlar el deformímetro vertical igual que para el ensayo de consolidación (experimento No. 13) para determinar cuando la consolidación haya terminado.

4. Separar cuidadosamente las mitades de la caja de corte dejando una pequeña separación apenas mayor que el tamaño de la partícula más grande presente en el suelo, retroceder los tornillos de separación y empalmar la cabeza de carga en su sitio utilizando los tornillos fijos para tal propósito.

Asegurarse de que la carga normal refleje la fuerza normal más el peso del bloque de carga y la mitad superior de la caja de corte.

Ser extremadamente cuidadoso al separar la caja de corte cuando se ensaya una arcilla blanda porque parte del material puede ser extruido fuera de la caja por la zona de separación —utilizar en esos casos cargas verticales pequeñas y/o hacer si puede requerir el hacer la consolidación antes de la separación de las cajas.

5. Acoplar el deformímetro de deformación cortante, fijar en cero tanto el deformímetro horizontal como el vertical. Para ensayos saturados, es necesario llenar la caja de corte con agua y esperar un tiempo razonable para que se produzca la saturación de la muestra.
 6. Comenzar la carga horizontal (cortante) y tomar lecturas del deformímetro de carga, desplazamiento de corte y desplazamientos verticales (de cambio de volumen). Si el ensayo se hace a deformación unitaria controlada tomar estas lecturas a desplazamientos horizontales de

5, 10 y cada 10 ó 20 unidades del deformímetro de desplazamiento horizontal.

Utilizar una tasa de deformación unitaria del orden de 0.5 a no más de 2 mm/min. No utilizar tasas de deformación unitaria demasiado altas, ya que es posible que la carga pico de corte esté entre dos lecturas. La tasa de deformación unitaria debería ser tal que la muestra "falle" en 5 a 10 min a menos que el ensayo sea de tipo CD.

La velocidad de deformación para el ensayo CD debería ser tal que el tiempo para que la falla ocurra t_f sea:

$$t_f \cong 50t_{50} \quad (\text{A-4})$$

donde t_{50} es el tiempo necesario para que ocurra el 50% de la consolidación bajo la carga normal P_v . Si t_{50} no es fácil de obtener, puede utilizarse

$$t_f = 35t_{60} = 25t_{70} = 12t_{90}$$

Puede hacerse una gráfica de la lectura de deformación vertical contra el log del tiempo similar a la del ensayo de consolidación del suelo. Cuando P_v es muy grande podría ser necesario aplicar la carga en incrementos en vez de aplicarla toda de una vez por las razones discutidas en el experimento No. 13.

7. Remover el suelo y tomar una muestra para contenido de humedad. Repetir los pasos 2 a 6 para dos o más muestras adicionales. Si el suelo está preconsolidado y se utilizan seis muestras para el ensayo, es preciso asegurarse de utilizar un rango de tres cargas normales a cada lado del esfuerzo de preconsolidación.

C. CALCULOS

Los siguientes cálculos son aplicables tanto a suelos cohesivos como a suelos no cohesivos.

1. Calcular el esfuerzo normal nominal como:

$$\sigma_n = \frac{P_v}{A}$$

donde A = área de la sección transversal de la muestra de suelo en la caja de corte
 P_v = carga total normal incluido el peso del bloque de carga y la mitad superior de la caja de corte.

2. Dibujar una curva de desplazamiento horizontal δ_h contra la fuerza cortante horizontal P_h para obtener el mayor valor de la fuerza cortante última.¹ Para calcular esfuerzo cortante como:

$$\tau = \frac{P_h(\text{último})}{A}$$

¹Como alternativa, dibujar una gráfica de las unidades de desplazamiento horizontal contra las unidades de desplazamiento del deformímetro de carga como se muestra en la Fig. 17-4 para obtener la máxima fuerza cortante.

ENSAYO DE CORTE DIRECTO (Cohesivos, no-Cohesivos)

Formato 21

Proyecto CORTE DIRECTO (DATOS EDITADOS) Trabajo No. ~

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación N.º ~ Muestra N.º ~

Descripción del Suelo ARENA MEDIA A GRUESA Profundidad de la Muestra ~

Realizado por J.E.B & R.G.L Fecha de la práctica 1/12/77

Estado de suelo (humedo-seco). Muestra de suelo (inalterada, alterada).

Datos para obtener la densidad de la muestra si no es inalterada

Peso inicial recipiente + suelo = 1326.7 g

Datos para el contenido de humedad

Peso final recipiente + suelo = 1236.0

Peso suelo húmedo + lata = ~

Peso de suelo usado = 140.7

Peso suelo seco + lata = ~

Datos de la muestra para corte

Dimensiones de la muestra:

Diám. o lado = 5.08 x 5.08 cm

Peso de la lata = ~

Altura = 3.42 cm

Peso del agua = ~

Area = 25.81 cm²

Peso del suelo seco = ~

Vol. = 88.26

Contenido de humedad, w% = ~

Densidad: = ~ $\gamma_{seco} = 15.62 \text{ kN/m}^3$ γ_{humedo} Carga normal = 5 kg Esfuerzo normal $a_n = 19.0 \text{ MPa}$

Velocidad de carga = 0.50 mm/min Constante del anillo de carga = 0.1406 kg/div.

	Lectura del deformímetro vertical (X0.01 mm)	Desplaz. vertical ΔV	Lectura del deformímetro horizontal (X0.01 mm)	Desplaz. horiz. ΔH	Área corregida A'	Deformímetro de carga reading	Fuerza de corte horizontal (N)	Esfuerzo cortante r. kPa
	0	0	0	0	--	0	0	0
	+0.5		10			14		
	+2.5		20			19		
	+3.0		40			24		
	+2.0		60			25		
	+2.0		75			26		
	+1.5		100			29		
	+1.5		150			30		
	+1.5		175			31		
	+1.5		200			31		
	+1.5		250			29.5		
	+1.5		300			26		

NOTA: VER FIG. 17-4 PARA EL GRAFICO. + V = EXPANSION DE LA MUESTRA

Nota: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

Para muestras cuadradas se puede usar como área corregida de la muestra en la falla como $A' = A_0 - b \Delta H$ para calcular a_n y r

Figura 17-3

Datos del ensayo de corte directo (suelo no-cohesivo)

Nota: En este cálculo se puede utilizar la fuerza cortante residual (aquel valor algo menor que la fuerza cortante última que se registra cuando se han inducido deformaciones superiores a las requeridas para desarrollar la fuerza cortante última) para obtener los parámetros de resistencia residual.

3. Dibujar el valor del esfuerzo cortante τ contra σ_n para el ensayo. Trazar una línea recta a través de los puntos dibujados (Fig. 17-5). Asegurarse de usar la misma escala tanto para la ordenada (τ) como para la abscisa. Obtener el intercepto de cohesión (si existe) con el eje ordenado y medir la pendiente de la línea para obtener el ángulo de fricción interno.

Si se dibujan los esfuerzos de resistencia residual al corte contra σ_n se encuentran los parámetros de resistencia residual al corte.

4. Sobre la gráfica de δ_h contra P_h y utilizando la misma escala para el desplazamiento horizontal hacer una gráfica de desplazamiento vertical contra δ_h (como en la Fig. 17-4). Esta gráfica mostrará el cambio de volumen contra el desplazamiento cortante del material. Hacer los comentarios adecuados en el informe sobre la magnitud y la forma de esta gráfica.
5. Es preciso comentar en el informe los valores obtenidos para los parámetros de resistencia al corte.

Hacer consideraciones sobre si debió utilizarse la corrección de área para calcular el esfuerzo cortante (y el esfuerzo normal) o si los resultados son conservativos o no conservativos por el hecho de no haber considerado dicha corrección.

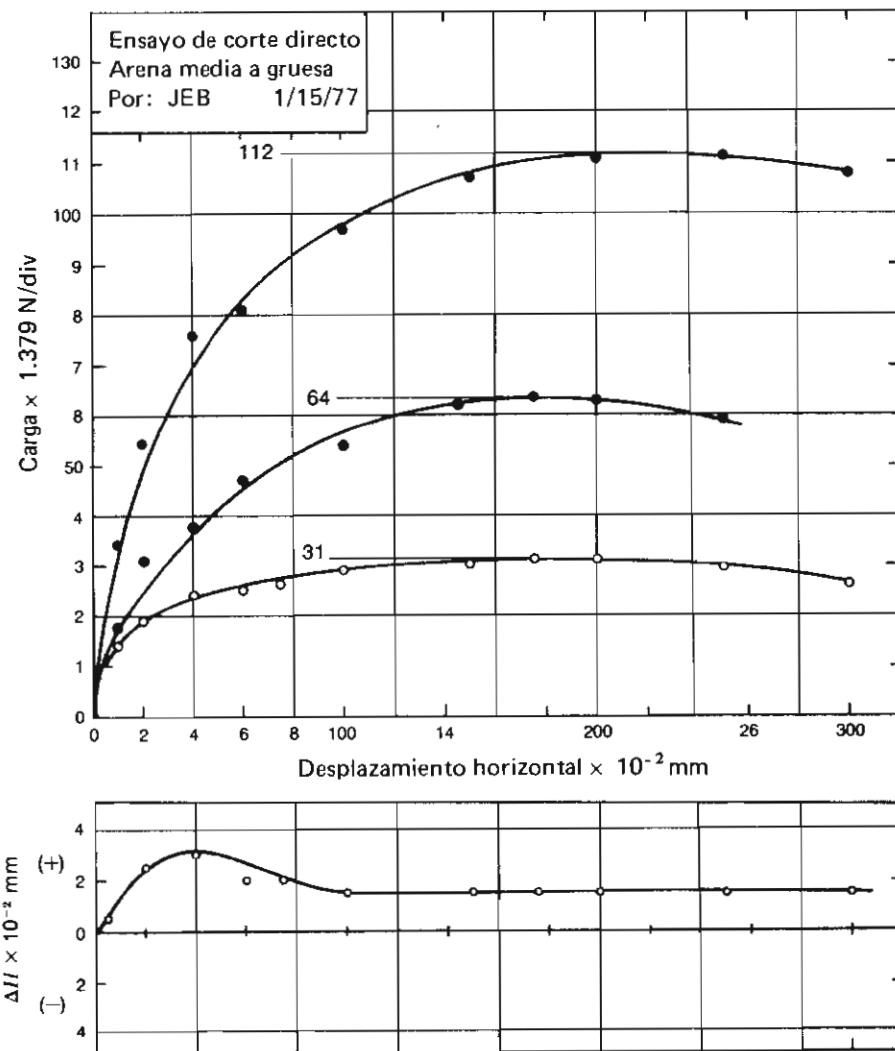


Figura 17-4
Gráfico del corte y el cambio de volumen vs. desplazamiento horizontal (nótese el tipo de unidades para economizar tiempo).

Comentar porqué es necesario en los experimentos 14 a 16 dibujar una curva de esfuerzo de deformación unitaria contra esfuerzo para obtener el máximo esfuerzo mientras que el máximo esfuerzo cortante a este ensayo de suelos se obtiene a partir de una gráfica como la de la Fig. 17-4.

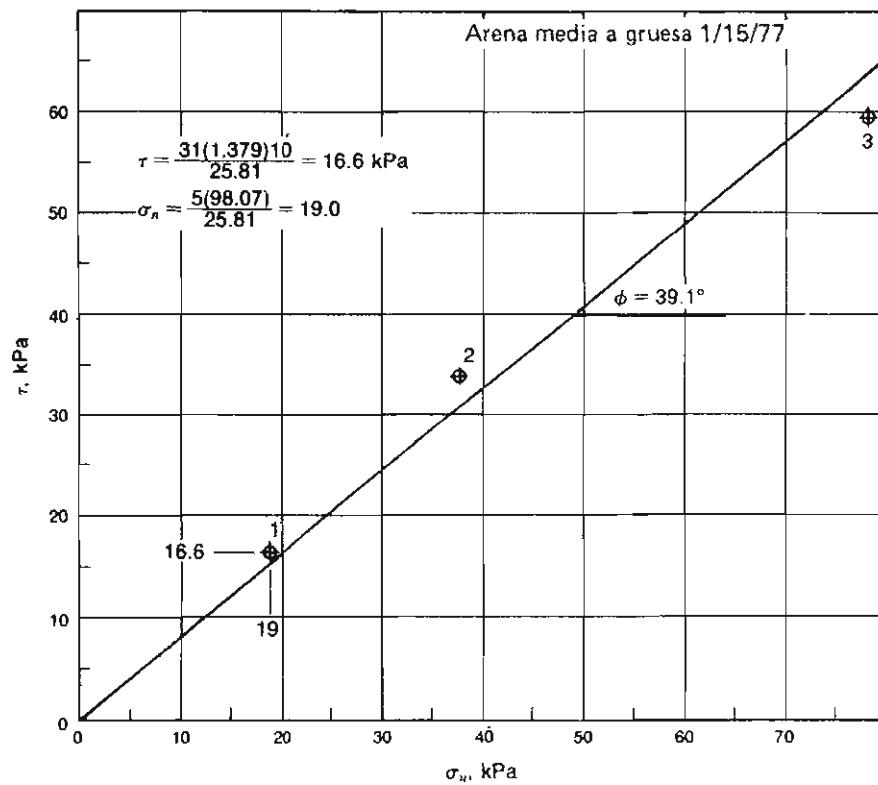


Figura 17-5
Gráfico del esfuerzo cortante vs. esfuerzo normal para obtener el(es) parámetro(s) del suelo.

Experimento N° 18

DETERMINACION DE LA DENSIDAD RELATIVA

Referencias

ASTM D2049-69

ASTM (1973), Densidad Relativa Involucrando suelos no cohesivos, *ASTM STP No. 523*.

Objetivo

Determinar el estado de densidad de un suelo no cohesivo con respecto a sus densidades máximas y mínimas. El estudiante será introducido a las limitaciones para este tipo de ensayos. Y a un método simple para obtener la densidad de compactación en un suelo no cohesivo.

Equipo

Molde patrón de compactación o molde de volumen calibrado como los utilizados en laboratorios de diseño de mezclas. Equipo de vibración manual o mecánica.

Discusión general

El método de impacto utilizado en la obtención de la curva humedad-densidad del experimento No. 9 no funciona adecuadamente para suelos no cohesivos (ya estén secos o húmedos). Algunas personas obtienen un control de densidad en laboratorio para este tipo de material llenando un molde patrón de compactación, en varias capas, confinando cada capa de alguna manera (ver Fig. 18-1), y vibrando el molde con golpes secos dados sobre los bordes del molde por medio de una maceta o martillo de goma o caucho. El máximo valor de densidad obtenido en varios intentos similares se toma como el criterio para el control del trabajo.

Un criterio ligeramente mejor podría obtenerse expresando el control de campo en términos de la *densidad relativa* D_r del suelo. Esta ha sido definida por Terzaghi como una ecuación fraccionaria de las relaciones de vacíos de los suelos en su estado más suelto (e_{\max}), en estado natural (e) y en su estado de máxima densidad posible (e_{\min}):

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (18-1)$$

A menudo, sin embargo, es más conveniente utilizar el peso unitario del suelo pues el cálculo de la relación de vacíos requiere el uso de la gravedad específica del suelo, la cual puede no ser conocida. Utilizando los pesos unitarios del suelo la densidad relativa puede expresarse nuevamente como:

$$D_r = \frac{\gamma_f - \gamma_i}{\gamma_2 - \gamma_i} \frac{\gamma_2}{\gamma_f} \quad (18-2)$$

donde γ_f = densidad del suelo en su estado natural (valor en el terreno)

γ_2 = peso unitario en el máximo estado de densidad obtenido en el laboratorio.

γ_i = peso unitario del estado de densidad más suelto obtenido en el laboratorio.

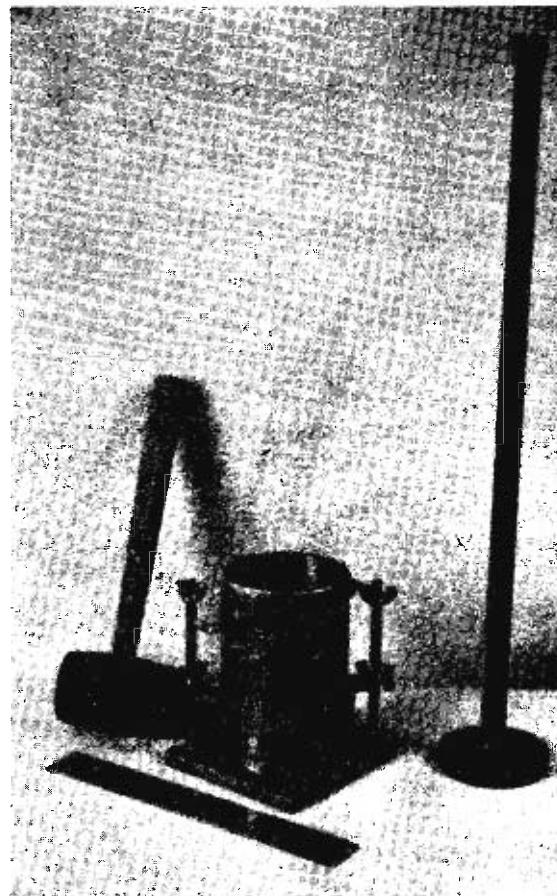


Figura 18-1

Equipo para densidad relativa sugerido por el autor. El equipo consiste de un molde de compactación de 1000 cm³ (molde SI), una maceta de caucho para vibración, una regla de acero para golpear seco en la superficie el molde, y una platina circular de 10.2 cm de diámetro soldada a un tubo para confinar el suelo mientras se le golpean los lados con la maceta.

Los problemas en este ensayo se presentan al definir adecuadamente en qué consiste el estado más denso y el estado más suelto del suelo. En consecuencia, algunos laboratorios utilizan equipos mecánicos de vibración, y bajo presiones de confinamiento y períodos de vibración seleccionados arbitrariamente, definen cuándo se encuentra el suelo en su estado de máxima densidad. En forma alternativa, la vibración de un suelo saturado se ha utilizado para obtener un valor arbitrario para la densidad máxima del suelo. En el método del autor presentado a continuación, no se obtuvo ningún aumento de densidad utilizando arena saturada.

El estado más suelto del suelo se define similarmente, excepto que en él se desea impedir completamente las vibraciones y echar cuidadosamente el suelo dentro de un volumen calibrado. El estado más suelto se ha definido también arbitrariamente dejando que el material caiga a través de agua para llenar un volumen dado.

El término *densidad relativa* no tiene significado particular para suelos cohesivos. Para estos materiales, se utilizan generalmente la *consistencia* (suave, medio firme, firme, dura, etc.) y el peso unitario para describir el estado del suelo.

En este momento (1977) parece, basado en los comentarios del STP 523 y las discusiones llevadas a cabo en el comité D-18 de la ASTM, que la norma vigente para la determinación de la densidad relativa podría ser retirada debido a la pobre reproducibilidad del ensayo.

Procedimiento *Esta es una práctica individual*

1. Cada persona debe tomar una muestra representativa de suelos no cohesivos secados al horno del recipiente de suministro respectivo. Asegurarse de romper los grumos restantes antes de utilizar el material.
2. Utilizar un molde patrón de compactación. Usar el mismo molde para la determinación del máximo y del mínimo estado de densidad de forma que no sea necesario obtener ni las dimensiones del molde ni calcular el volumen del mismo.

3. Hacer tres ensayos de densidad máxima colocando el material en el molde patrón en 5 capas, cada una de ellas compactada con un bloque redondo de acero de por lo menos 12 kg o mediante la ayuda de otros estudiante para confinar el suelo utilizando una placa de confinamiento (como se muestra en la Fig. 18-1) mientras que otra persona da de 15 a 25 golpes secos a los lados del molde (de acuerdo con la especificación del instructor) con un martillo de caucho. Asegurarse de registrar en el informe el número de golpes y de capas. Después de cada ensayo volver a mezclar cuidadosamente el suelo de ensayo con el que haya quedado en el recipiente para el siguiente ensayo.

Utilizar la máxima densidad obtenida (en el informe debe discutirse por qué), no el promedio, como el valor característico de la densidad máxima del suelo. Poner este valor en el tablero o en el sitio especificado por el instructor.

4. A continuación, utilizando el mismo suelo y molde echar el material en el molde, y distribuirlo ligeramente con un movimiento circular sobre el molde. Echar suficiente material como para que sobresalga ligeramente del molde y luego con una regla quitar el exceso con el mínimo posible de vibración. Obtener el peso del ensayo y repetirlo por lo menos dos veces más.

Utilizar la menor densidad obtenida como el valor de la densidad mínima del suelo. Anote este valor en el tablero, al lado del valor obtenido anteriormente para la densidad máxima. Asegurarse de identificar el trabajo de forma que el instructor sepa quiénes no han completado todavía el trabajo asignado¹.

Nota: Para este proyecto no hay formatos especiales.

Cálculos

1. Cada estudiante debe calcular la desviación normal $\bar{\sigma}$ del conjunto de valores de densidad mínima y densidad máxima encontradas por toda la clase. Utilizar para la media de la muestra \bar{X} los valores máximos y mínimos de densidad de la clase y no la media de las dos poblaciones.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{X}^2 - X^2)}{N - 1}}$$

donde N = número de ensayos de densidad

X = cualquier valor de densidad obtenido en un ensayo

2. Sobre la base de $\bar{\sigma}$, γ_{\max} , γ_{\min} y un peso unitario arbitrario para el promedio de γ_{\max} y γ_{\min} , calcular el error esperado máximo y mínimo en D_r para un solo ensayo de densidad relativa en este suelo.
3. Deduzca la ec. (18-2) a partir de la ec. (18-1).
4. Comente la manera de mejorar este ensayo.
5. Comente el empleo de $N - 1$, en lugar de N para el cálculo de la desviación normal.

¹ El instructor debería colocar todos los valores de densidad en un esténcil y hacer copias para todos los estudiantes cuando se haya culminado la determinación de densidades hechas por la clase.

Experimento N° 19

ENSAYO DE LA RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)

Referencias

AASHTO T193-63

ASTM D1883-73

Objetivo

Introducir al estudiante a un método para evaluar la calidad relativa del suelo para subrasante, sub-base, y base de pavimentos.

Equipo

Equipo de CBR (ver Fig. 19-1) que consta de:

Molde de compactación de 15.2 cm de diámetro X 17.8 cm de altura (o equivalente, con collar).

Disco espaciador de 15.1 cm de diámetro X 6.14 cm de altura (ó 5.1 cm de altura si ese está disponible).

Martillo de compactación (bien el de 24.5 N o el de 44.5 N según lo designe el instructor).

Aparato para medir la expansión con deformímetro de carátula con precisión de 0.01 mm.

Pesos para sobrecarga.

Máquina de compresión equipada con pistón de penetración CBR (diámetro de 4.953 cm con sección transversal de 19.4 cm²) y capaz de penetrar a una tasa de 1.27 mm/min.



Figura 19-1

Equipo para CBR. A la izquierda; molde, collar y soporte para el deformímetro para el ensayo de inmersión; martillo de compactación de 24.5 N, base y disco espaciador de 5.1 cm de espesor al fondo. Placa de expansión con varilla de extensión y pesos de sobrecarga tanto para inmersión como para penetración, en primer plano.

Exposición general

El ensayo de relación de soporte de California se desarrolló por parte de la División de

Carreteras de California en 1929 como una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como sub-rasante o material de base en construcción de carreteras. Durante la segunda guerra mundial, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos.

El ensayo CBR (la ASTM denomina el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, pero de la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un suelo dado sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo. De paso, es interesante comentar que el experimento puede hacerse en el terreno o en un suelo compactado, pero este aspecto se encuentra fuera del objetivo del presente manual de laboratorio.

El número CBR (o simplemente, CBR) se obtiene como la relación de la carga unitaria (en libros por pulgada cuadrada) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración (con un área de 19.4 cm^2) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la *carga unitaria patrón* requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de manterial triturado. En forma de ecuación esto es:

$$\text{CBR} = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} \times 100 (\%) \quad (19-1)$$

De esta ecuación se puede ver que el número CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica, el símbolo de porcentaje se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero, como 3, 45, 98. Los valores de carga unitaria que deben utilizarse en la ecuación (19-1) son los siguientes:¹

PENETRACION		CARGA UNITARIA PATRON	
mm	pulg	MPa	psi
2.5	0.10	6.9	1,000
5.0	0.20	10.3	1,500
7.5	0.30	13.0	1,900
10.0	0.40	16.0	2,300
12.7	0.50	18.0	2,600

El número CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.5 mm. Sin embargo, si el valor de CBR a una penetración de 5.0 mm es mayor, el ensayo debería repetirse (ordinariamente). Si un segundo ensayo produce nuevamente un valor de CBR mayor de 5.0 mm de penetración, dicho valor debe aceptarse como valor final del ensayo.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación estándar (o modificando) del experimento No. 9. A continuación utilizando los métodos 2 ó 4 de las normas ASTM D698-70 ó D1557-70 (para el molde de 15.2 cm de diámetro), se debe compactar las muestras utilizando las siguientes energías de compactación²:

Método	Golpes	Capas	Peso del martillo N
D698: 2 (suelos de grano fino)	56	3	24.5
4 (suelos gruesos)	56	3	24.5
D1557: 2 (suelos de grano fino)	56	5	44.5
4 (suelos gruesos)	56	5	44.5

¹ Valores tomados de la norma ASTM, parte 19, Ensayo D 1883-73.

² Para el molde patrón y el disco espaciador, ajustar el número de golpes-capa si se utiliza el espaciador de 5.1 cm de altura (ver el formato de la Fig. 19-6).

A menudo se compactan dos moldes de suelo — uno para penetración inmediata y otro para penetración después de dejarlo saturar por un período de 96 horas. El segundo espécimen es saturado durante 96 horas con una sobrecarga aproximadamente igual al peso del pavimento que se utilizará en el campo pero *en ningún caso el peso de la sobrecarga será menor de 4.5 kg.* Es necesario durante este período tomar registros de expansión para instantes escogidos arbitrariamente y al final del período de saturación se hace la penetración para obtener el valor de CBR para el suelo en condición de saturación completa.

En ambos ensayos de penetración para determinar los valores de CBR se coloca una sobrecarga sobre la muestra de la misma magnitud de la que se utilizó durante el ensayo de expansión. El ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos:

1. Dar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura.
2. Dar indicación de la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo.

El ensayo de penetración se lleva a cabo en una máquina de compresión utilizando una tasa de deformación unitaria de 1.27 mm/min. Se toman lecturas de carga contra penetración a cada 0.5 mm de penetración hasta llegar a un valor de 5.0 mm a partir del cual se toman lecturas con incrementos de 2.5 mm hasta obtener una penetración total de 12.7 mm.

El valor de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente con fines de utilización con base y sub-rasante bajo pavimentos de carreteras y aeropistas. La siguiente tabla da calificaciones típica¹.

No. CBR	Clasificación General	Usos	SISTEMA DE CLASIFICACION	
			Unificado	AASHTO
0-3	Muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Pobre a regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Regular	Sub-base	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Bueno	Base, sub-base	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
> 50	Excelente	Base	GW, GM	A1a, A2-4, A3

Se publican mucho diseños de pavimentos en los cuales se entra a la tabla con el número CBR y se lee directamente el espesor de Sub-rasante, base, y/o espesor del pavimento flexible, basado en las cargas de llanta esperada.² Algunas veces el valor de CBR se convierte a módulo de sub-rasante (utilizando también tablas) antes de entrar a las tablas de diseño de pavimentos.

A. TRABAJO DE LABORATORIO

1. Preparar aproximadamente 4.5 kg de suelo de grano fino menor que el tamiz No. 4 ó 5.5 kg de material con partículas de 19 mm de diámetro máximo, al contenido de humedad óptima del suelo determinado con el esfuerzo de compactación adecuado (ensayo de compactación). Si se desea curar el suelo para obtener una distribución más uniforme de la humedad, se debe mezclar con el porcentaje necesario de humedad y almacenar en un recipiente sellado por espacio de 12 a 24 horas antes del ensayo.
2. Antes de compactar el suelo en un molde, se debe tomar una muestra representativa para determinar su contenido de humedad (por lo menos 100 g si el suelo es de grano fino).
3. Pesar el molde sin su base ni el collar.
4. Ajustar el molde a la base, insertar el disco espaciador (el disco redondo sólido de 15.1 X 5.1 cm) en el molde y cubrirlo con un disco de papel de filtro (véase la Fig. 19-2).

¹ "El Manual del Asfalto", The Asphalt Institute, 1962, capítulo 5.

² E. J. Yoder, "Principios de Diseño de Pavimentos", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1959, capítulos 14 y 15. Ver también Desarrollo de un método de Diseño de Pavimentos Flexibles para Aeropistas con CBR — Un Simposio, Trans. ASCE, Vol. 115, 1959, pp. 433-589.

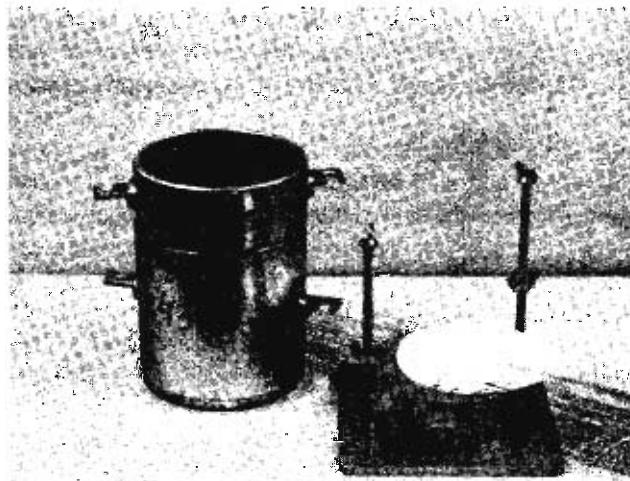


Figura 19-2

Molde, collar y base para el ensayo. Colocar el disco espaciador (con 5.1 cm de espesor) sobre la base perforada y cubrirlo con un disco de papel de filtro para que el suelo no se pegue durante la compactación.

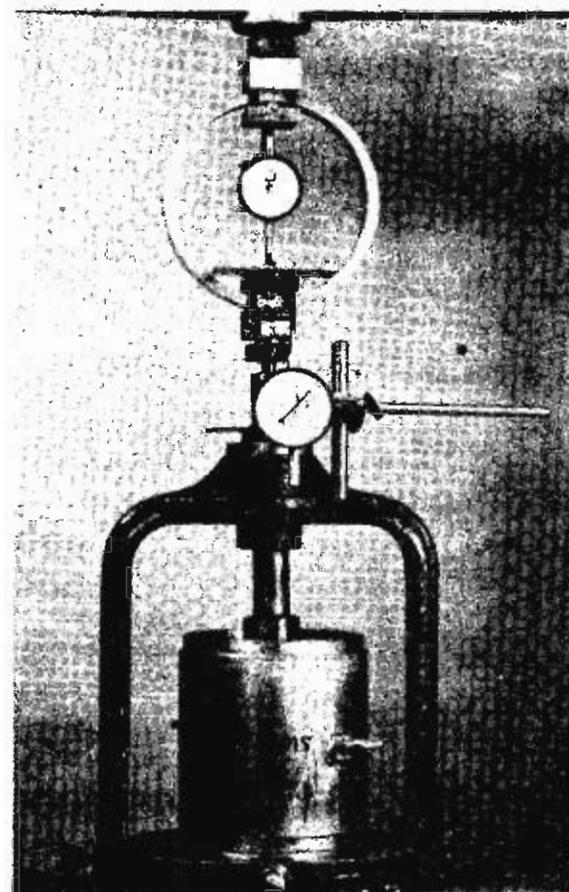
5. Compactar el suelo de acuerdo con la norma ASTM D698 ó D1557 Métodos B o D para el suelo utilizada *de acuerdo con lo especificado por el instructor*. Tomar una muestra representativa para determinar el contenido de humedad final del suelo remanente.
6. Quitar el collar y enrasar la muestra suavemente hasta niverla en el molde. Llenar con suelos finos los pequeños huecos que se hayan podido formar en la operación anterior de nivelación de la muestra. Para suelos de grano grueso se pueden utilizar partículas de suelo ligeramente menores que el agujero para completar el volumen en el sitio requerido.
7. Retirar la base y el disco espaciador, pesar el molde con el suelo compactado y determinar el peso unitario total del suelo.
8. Colocar un disco de papel de filtro sobre la base, invertir la muestra (de forma que el espacio de 5.1 cm dejado por el disco espaciador quede en la parte superior), y asegurar el molde a la base de forma que el suelo quede en contacto con el papel de filtro.

Para muestras no saturadas, llevar a cabo los pasos 9 a 11 que se presentan a continuación.

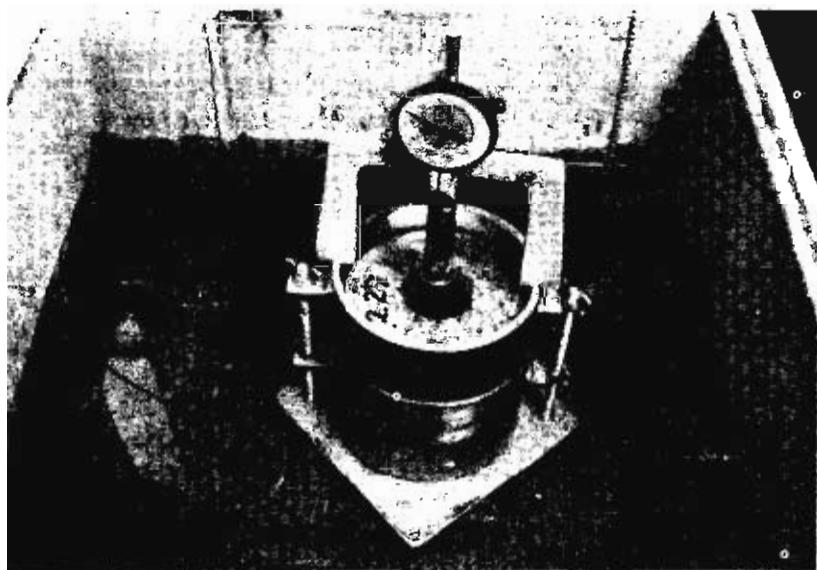
9. Colocar suficientes pesas ranuradas (no menos de 4.5 kg) sobre la muestra de suelo para simular la presión de sobrecarga requerida.
10. Colocar la muestra en la máquina de compresión y sentar el pistón sobre la superficie de suelo utilizando una carga inicial no mayor de 4.5 kg (Fig. 19-3). Fijar el cero en los deformímetros de medida de carga y de penetración (o deformación).
11. Hacer lecturas de deformación o penetración como se indica en la "Exposición general" y tomar las respectivas lecturas del deformímetro de carga. Extruir la muestra del molde y tomar dos muestras representativas adicionales para contenido de humedad.

Para muestras saturadas:

12. Colocar la placa perforada con el vástago ajustable sobre el suelo compactado y aplicar suficientes pesas ranuradas adicionales para obtener la sobrecarga deseada dentro de una aproximación de 2.2 kg, cuidando de que la sobrecarga total no sea inferior a 4.5 kg. Registrar la sobrecarga total (asegurarse de incluir la placa perforada como parte del peso de sobrecarga). También asegurarse de usar un disco de papel de filtro entre la base perforada del vástago y el suelo para evitar que el suelo se pegue a la base del vástago.
13. Sumergir el molde y las pesas en un recipiente de agua de forma que el agua tenga acceso tanto a la parte superior como a la parte inferior de la muestra y ajustar el deformímetro de carátula (con lecturas al 0.01 mm) en su respectivo soporte (Figs. 19-4 y 19-5). Marcar sobre el molde los puntos donde se apoya el soporte de forma que pueda removese y volverse a localizar sobre el molde en el mismo sitio cuando se desee hacer una lectura.

**Figura 19-3**

Montaje para el ensayo de penetración para el CBR. Nótese que el pistón tiene en la punta un área de 19.35 cm^2 y ajusta exactamente en el agujero central de las pesas de sobrecarga de la Fig. 19-1.

**Figura 19-4**

Montaje para el ensayo de inmersión. El agua del recipiente de inmersión debe cubrir las pesas de sobrecarga. Nótese que la varilla de extensión de la placa de expansión se extiende a través del hueco central en las pesas de sobrecarga hasta hacer contacto con la punta del deformímetro montado en su respectivo soporte. Normalmente se señala con un marcador sobre el borde del collar la posición de las patas del soporte del deformímetro con el fin de poderlo remover y/o usar en múltiples ensayos.

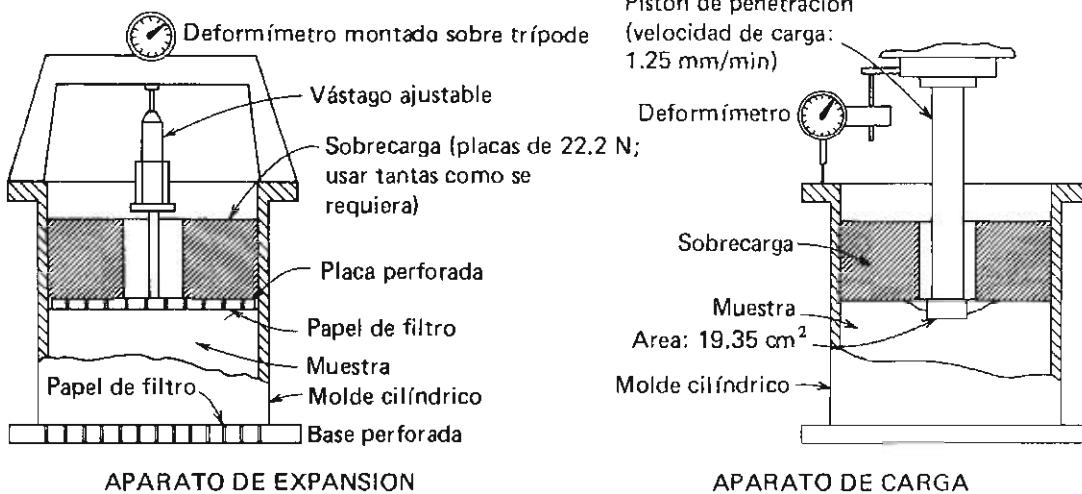


Figura 19-5
Detalles del ensayo de CBR. *Nota:* Usar sobrecarga de 2.3 kg (22.2 N) ya que sus pesos se registran en balanzas de laboratorio.

14. Ajustar en cero el deformímetro de expansión y registrar el tiempo de comienzo del ensayo. Tomar las lecturas a:

0, 1, 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48, 72 y 96 horas

de tiempo transcurrido. El ensayo de expansión puede terminarse después de 48 horas si las lecturas en el deformímetro de expansión se mantienen constantes por lo menos durante 24 horas.

15. Al final de las 96 horas de inmersión, sacar la muestra y dejarla drenar por espacio de 15 min. Secar completamente la superficie superior de la muestra con toallas de papel.
 16. Pesar la muestra sumergida incluyendo el molde.
 17. Hacer los pasos 9 a 11 (es decir, tomar lecturas de penetración y cargas).
 18. Tomar muestras para contenido de humedad del espécimen saturado de la siguiente forma:
- Dos dentro de los 3 cm superiores del suelo
 - Dos dentro de los 3 cm inferiores del suelo
 - Dos en el centro de la muestra de suelo.

B. CALCULOS Y PRESENTACION DE DATOS

1. Dibujar una curva de resistencia a la penetración (la ordenada) en kilopascales (kPa) contra la penetración en mm tanto para la muestra recién compactada como para la muestra saturada. Si la curva no es escencialmente lineal a través del origen, extender una línea desde la porción recta de la curva para tratar de interceptar el eje de las abscisas. La diferencia entre este valor y la penetración correspondiente a cero es una corrección que debe utilizarse para calcular el valor de CBR. Las curvas para ambas muestras (la saturada y la recién compactada) deben dibujarse en la misma gráfica con su identificación adecuada, junto con los valores de corrección de las curvas, de forma que se pueda apreciar fácilmente el efecto de saturación en la muestra. Consultar las Figs. 19-6 a 19-8 para los cálculos y la forma de presentación de datos. Utilizar una hoja de papel tomada de la sección de formatos del manual.

2. Obtener la resistencia a la penetración para 2.5 y 5.0 mm de la curva (utilizando las correcciones del paso 1 anterior si se necesitan) y calcular el valor de CBR.

Nota: Cuando se trata de trabajo de laboratorio para estudiantes, si el CBR a 5.0 mm es mayor que el correspondiente a una penetración de 2.5 mm el ensayo no debe repetirse, pero ambos valores de CBR deben registrarse en el informe.

ENSAYO DE RELACION DE SOPORTE

Formato 22

Proyecto ENSAYO DE C.B.R.

Trabajo No. ~

Localización del proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~

Descripción del suelo ARCILLA LIMOSA AZUL A-4(8) $W_L = 28.4\%$
 $W_p = 19.8\%$

Realizado por J.E. B & R.G.L Fecha de la práctica 6-16-76

Energía de compactación: Martillo 24.5 N No. de capas 5 Golpes/Capa 40

w de compactación 18.7 % Diám. del molde 15.2 cm Altura de suelo 12.7 cm Vol. 2305 cm³Peso húmedo Peso seco
del suelo 4704 g del suelo, W_s 3933 g $\gamma_{\text{humedo}} = 20.02 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{\text{seco}} = 16.74 \text{ kN/m}^3$

Datos de expansión SE USÓ UN ESPACIADOR DE 5.08 Y SE AJUSTÓ DE 37 A 40 GOLPES

Hora y fecha de iniciación	Tiempo transcurrido	Molde No. <u>1</u>	Sobrecarga <u>44.5</u> N	Molde No. _____	Sobrecarga _____ N	Molde No. _____	Sobrecarga _____ N
		Lectura del deformímetro ($\times 0.01 \text{ mm}$)	$\% = \frac{S}{H} (100)$	Lectura del deformímetro (\times _____)	$\% = \frac{S}{H} (100)$	Lectura del deformímetro (\times _____)	$\% = \frac{S}{H} (100)$
6/16 a.m. 10:30	0 h	0	0				
	1 h	0.047	0.037%				
	2 h	0.071	0.056				
	4 h	0.108	0.085				
	14	0.140	0.110				
6/17 a.m. 10:30	24	0.190	0.150				
12 Mid.	37.5	0.272	0.214				
6/18 12: Noont	49.5	0.300	0.236				
12 Mid.	61.5	0.325	0.256				
6/19 12 Noont	73.5	0.335	0.264				
6/20 1:00 P.M.	98.5	0.355	0.280				

Después de la inmersión

Molde No.	<u>1</u>		
Sobrecarga, N	<u>44.5</u>		
Peso inicial de suelo húmedo + molde + base	<u>12,056 g</u>		
Peso final de suelo húmedo + molde + base	<u>12,130</u>		
Peso molde + base	<u>7,352</u>		
Peso inicial de suelo húmedo, W_i	<u>4704</u>		
Peso de agua absorbida, W_w	<u>749</u>		
% Agua absorbida = W_w/W_i	<u>1.88 %</u>		

Nota: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

Figura 19-6

Datos de un ensayo de expansión para CBR.

ENSAYO DE RELACION DE SOPORTE

Formato 23

Proyecto ENSAYO C. B. R. Trabajo No. ~

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY Perforación No. ~ Muestra No. ~

Descripción del Suelo ARCILLA LIMOSA AZUL A-4(8) $W_L = 28.4\%$ $W_p = 19.8\%$

Realizado por J.E.B. & R.G.L Fecha de la práctica 6-20-76

Datos del ensayo de carga del CBR (saturado, no saturado) (Señale la condición aplicable)

Penetración mm	Molde No. 3 Sobrecarga 44.5N	Molde No. 1 Sobrecarga 44.5N	Molde No. Sobrecarga			
	Lectura del deformímetro de carga ($\times 0.579 \text{ kN/d}$)	Carga kPa	Lectura del deformímetro de carga ($\times 0.579 \text{ kN/d}$)	Carga kPa	Lectura del deformímetro de carga ()	Carga kPa
0.000	0	0	0	0		
0.5	100	293	33	97		
1.0	154	452	57	167		
1.5	188	552	78	229		
2.0	222	651	96	282		
2.5	251	737	113	332		
3.0	277	813	131	384		
4.0	301	883	149	437		
5.0	347	1020	181	531		
6.0	388	1140	204	600		
7.5	429	1260	249	731		
9.0	494	1450	274	804		
10.0	525	1541	290	860		
12.5	635	1863	332	974		
Contenido de humedad final, W% (muestra saturada, no saturada)	½ superior	14.6%			MUESTRA	
	½ medio	14.7			SACADA DEL HORNO	
	½ inferior	15.3			~	
	promedio	14.9%			21.5%	

Peso unitario húmedo = 19.92 kN/m^3 Peso unitario seco = 17.34 kN/m^3 No. 3
20.02 16.47 No. 1 (SUMERGIDO)

Nota: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

Figura 19-7

Datos de carga-penetración para un ensayo CBR no sumergido y para otro sumergido como se ejecutan normalmente.

3. Calcular los contenidos de humedad y las densidades secas de las muestras antes de saturar y en la condición final luego de saturadas. Para la muestra saturada, utilizar los datos del paso 18 del procedimiento A.
4. Calcular el porcentaje de expansión sobre la base de la altura nominal inicial de la muestra. Dibujar una curva de porcentaje de expansión (ordenada) contra el tiempo transcurrido en una gráfica separada.
5. El informe debe comparar los valores de CBR, presentar un resumen de los contenidos de humedad adecuadamente identificados, e incluir las curvas requeridas. Discutir el significado de un valor grande o pequeño obtenido en el CBR, cualquier cambio sufrido en el valor de CBR con la saturación, y cualquier expansión que hubiera podido tener lugar. ¿Cómo podría reducirse la expansión (si existe una cantidad significativa) o eliminarse para este suelo? Asegurarse de registrar en el informe los datos de Clasificación Unificada del Suelo y su respectiva clasificación AASHTO.

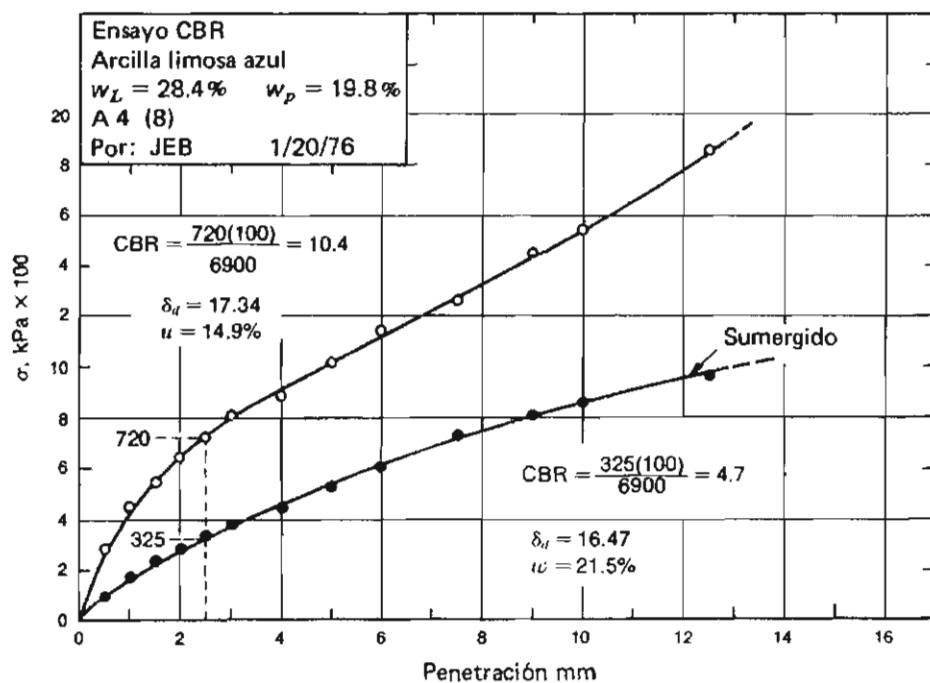


Figura 19-8
Gráfico de carga vs. penetración para calcular los valores de CBR para el suelo.

Experimento N° 20

CONSTRUCCION DE REDES DE FLUJO UTILIZANDO ANALOGIA ELECTRICA

Referencias

- Herbert, R. y K. R. Rushton (1966). Estudios de Flujo de Agua Subterránea con Redes de Resistencia, *Geotechnique*, Londres, Vol. 16 No. 1, Marzo, pp. 53-75.
- Lane, E. W., F. B. Campbell, y W. H. Price (1934), La Red de Flujo y Analogía Eléctrica, *Civil Engineering*, Octubre, pp. 510-514.
- Selim, M. A. (1974), Represas en Medios Porosos, *Transaction, ASCE*, Vol. 112, pp. 488-505.
- Zanger, C. N. (1953), Teoría y Problemas de Percolación de Agua, *U. S. Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 8*, Abril, 76 páginas.

Objetivo

Introducir al estudiante al concepto de que el flujo de un fluido por un medio poroso es similar (análogo) al flujo de una corriente eléctrica a través de un medio conductor de corriente.

Equipo

Voltímetro de tubo de vacío (VTVM) o puente de Wheatstone (Fig. 20-1)

Fuente de voltaje de CD

Papel Teledeltos¹

Tijeras

Pintura de plata para hacer electrodos²

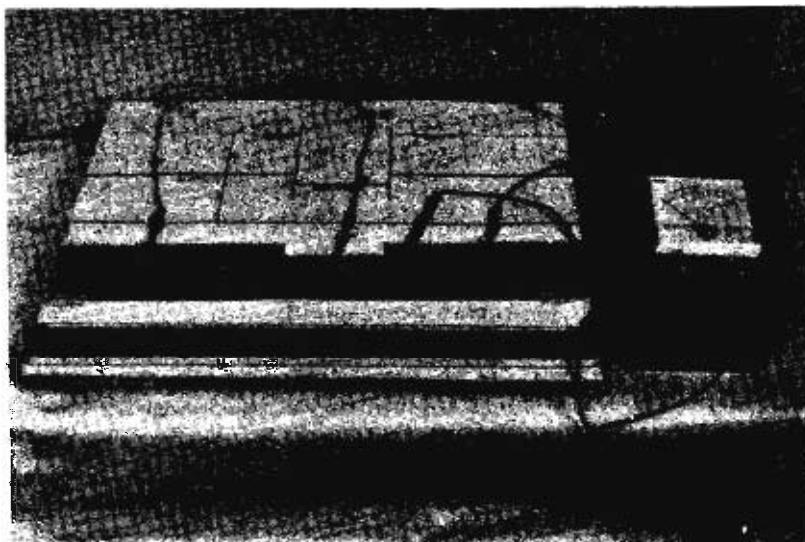


Figura 20-1

Montaje para la analogía eléctrica. El molde recortado en papel Teledeltos representa las condiciones apreciadas en el dibujo montado arriba del contorno. Las ranuras cortadas en el molde duplican el efecto de la penetración de las tablestacas. Nótese que se establece el voltaje entre los lados y la porción central.

¹ El papel Teledeltos puede obtenerse de la Western Union Telegraph Co., Marketing Operation, 60 Hudson Street, New York, N. Y. 10013.

² La pintura de plata puede obtenerse de GC Electronics, Rockford, Illinois.

Exposición general

La construcción de una red de flujo para describir el flujo bidimensional de agua a través de una masa de suelo como una solución gráfica aproximada de la ecuación de Laplace:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (20-1)$$

es una operación bastante tediosa. El problema se vuelve aún más difícil cuando los coeficientes de permeabilidad (k_x y k_y) en la ec. (20-1) son diferentes en las direcciones x e y . Y todavía más difícil si el suelo está estratificado o si las condiciones de frontera son irregulares.

Se ha encontrado que el flujo de una corriente eléctrica de una zona de alto potencial a otra de baja potencial es análogo al flujo de agua causado por una cabeza diferencial. De esta similitud se concluye que se puede construir la forma de la masa porosa con un material conductor de electricidad e imprimir una diferencia de voltajes en puntos adecuados para simular la cabeza diferencial de agua entre los dos (o más) puntos. Los voltajes, obtenidos por medio de una sonda eléctrica, en diferentes puntos dentro del molde serán en cierta escala el valor del potencial de cabeza de agua en ese punto. Se pueden construir modelos de conducción eléctrica de:

1. Malla de alambre (como la que se usa en el tamiz No. 200 o en otras mallas finas similares).
2. Láminas metálicas u hoja metálica.
3. Arena fina que haya sido tratada para que no conduzca la electricidad, introducida en un modelo, saturada a continuación con una solución de agua que contenga un electrolito. Este método puede requerir la utilización de voltaje AC para evitar que se polaricen las partes del modelo cuando se introduzca la sonda.
4. Papel de Teledeltos (o cualquier otro papel conductor eléctrico de manufactura comercial).

Es posible utilizar otros modelos de analogía eléctrica, sin embargo los ítems 1 y 4 de la lista anterior son los más comúnmente utilizados.

Nótese que es posible construir modelos tanto para flujo bidimensional (bien en planta o en alzada) como para flujo tridimensional.

En un modelo es posible simular diferentes coeficientes de permeabilidad lo mismo que estratificación o lentes de distintos materiales, introduciendo trozos de sustancias de mayor o menor conductividad, dependiendo de la perseverancia e ingenio de quien se esté valiendo del modelo.

Dentro del alcance de este texto se ilustrarán varios ejemplos simples de utilización de cortes hechos en papel Teledeltos (o en modelos de malla metálica). En la Fig. 20-2a el suelo existente se muestra sobre una base impermeable (una condición de frontera). La Fig. 20-2b muestra los cortes correspondientes y la localización de los voltajes necesarios para simular la cabeza de agua mostrada en la Fig. 20-2a.

El VTVM debe fijarse para leer un voltaje establecido entre los electrodos A y B del circuito de, por ejemplo, 10 volts (V) haciendo un ajuste adecuado a la fuente de corriente DC.¹ Este potencial eléctrico es análogo a la cabeza de potencial hidráulico de 13.5 mostrado en la Fig. 20-2a; así cada 1.35 m de agua corresponden a una diferencia de voltaje de 1 volt sobre la escala del VTVM. Es posible lograr una analogía 1 a 1 entre las cabezas de agua y el voltaje; sin embargo, esto puede requerir voltajes suficientemente altos para ser inconvenientes para trabajar, o causar chisporroteo — aún para los amperajes tan bajos que se pueden conseguir con la fuente DC. La corriente suministrada por la fuente de potencial debe estar en el rango de los miliamperios.

¹ Con papel Teledeltos se puede utilizar voltaje DC.

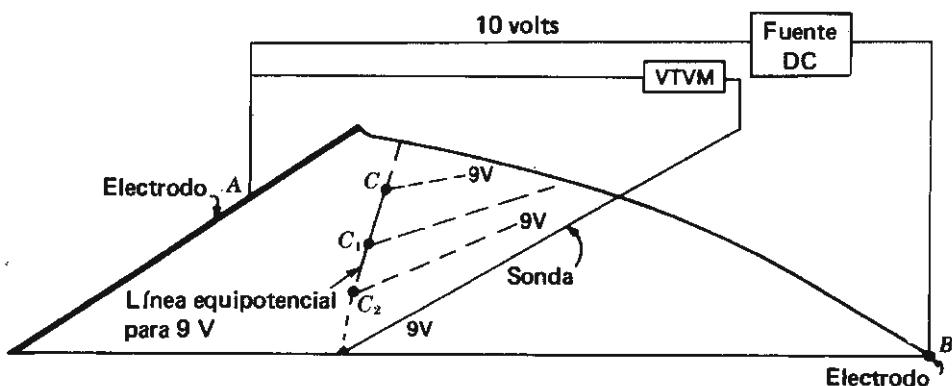
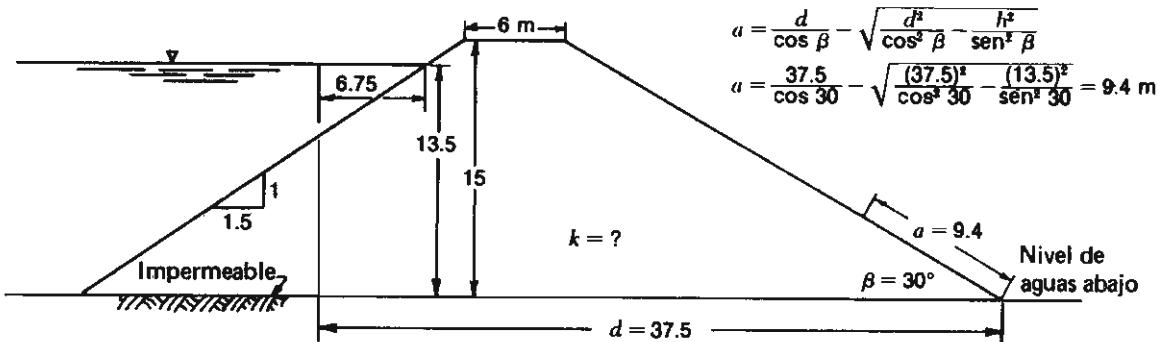


Figura 20-2

Presa de tierra permeable sobre base impermeable.

Ahora, para encontrar una línea equipotencial (línea de igual cabeza total), es necesario tomar una sonda eléctrica desde la parte “baja” del VTVM y encontrar una posición, tal como C en el corte de la Fig. 20-2 b la cual corresponda a, por ejemplo, 9 V (se comenzó con 10 V en este ejemplo). Esto corresponde a una cabeza remanente en la masa de suelo de

$$\frac{h_L}{1} \text{ V} = 13.5 \text{ pies de } \frac{\text{H}_2\text{O}}{10} \text{ V}$$

de lo cual:

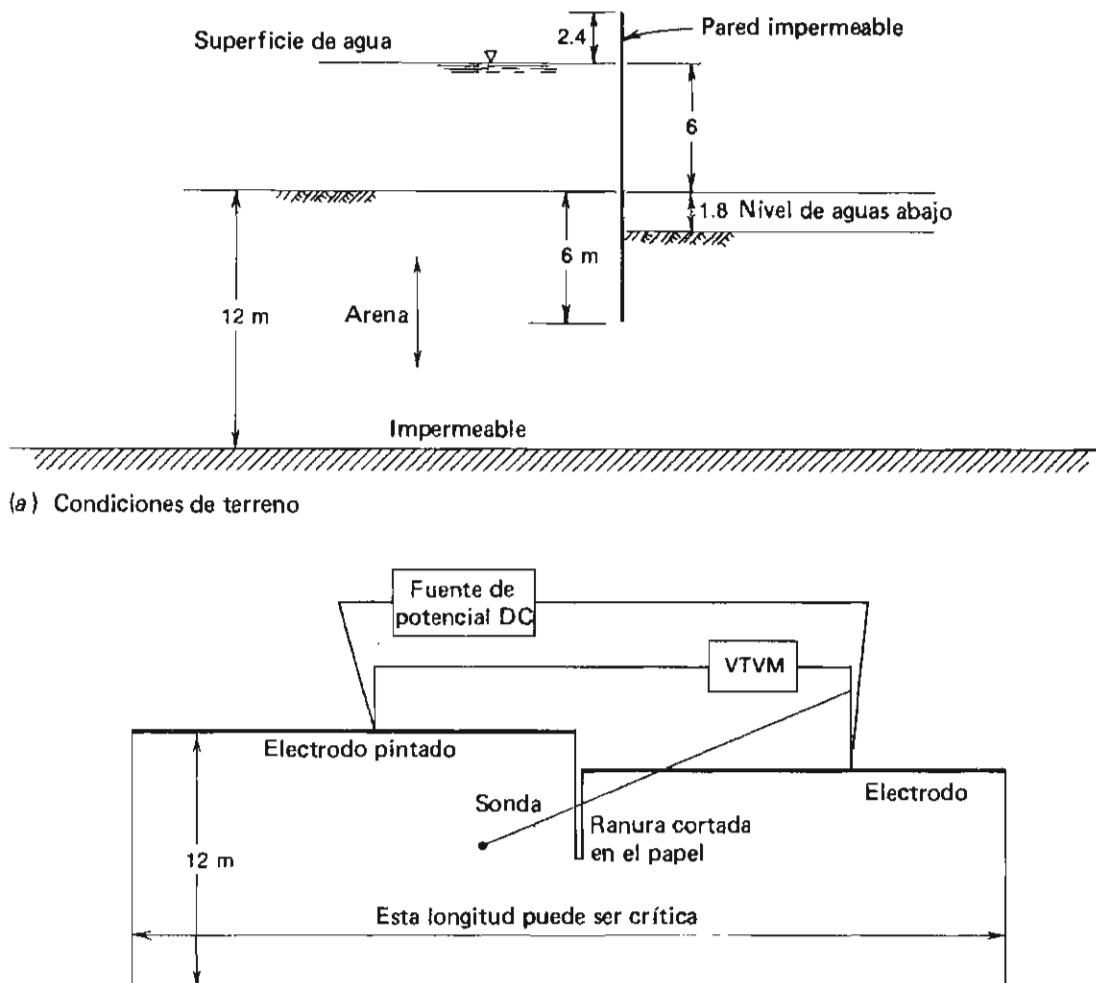
$$h_L \frac{13.5}{10} = 1.35 \text{ m}$$

Por consiguiente, la cabeza remanente es:

$$h_{\text{remanente}} = 1.35 \times 9 \text{ V} = 12.15 \text{ m de agua}$$

Si se encuentra una serie de puntos tales como C para los cuales el voltímetro mida 9 V en cada uno de ellos, el lugar geométrico establecido de esa manera corresponde a una línea equipotencial para una cabeza remanente de 12.15 m de agua. Un análisis similar puede hacerse para líneas equipotenciales correspondientes a 8, 7, 6, etc., obteniendo de esa forma líneas equipotenciales para 10.8, 9.45, 8.1 m etc., de cabeza total remanente.

Utilizando esta técnica es difícil obtener las fronteras de flujo para completar la red de flujo; sin embargo, con líneas equipotenciales dibujadas en forma bastante aproximada,



(b) Molde cortado en papel Teledeltos, con electrodos pintados sobre el sitio adecuado, con voltaje aplicado y VTVM

Figura 20-3
Análisis de red de flujo para muro sencillo de tablestacas.

es bastante sencillo concluir el dibujo a mano alzada de los canales de flujo correspondientes para satisfacer la ec. (20-1).

La Fig. 20-3a y b muestra un sistema de tablestacado y los correspondientes cortes para desarrollar una solución por analogía eléctrica que permita establecer líneas equipotenciales.

En la Fig. 20-3b, la ranura delgada conforma una barrera eléctrica que simula la naturaleza impermeable de la tablestaca. Como en el caso anterior, el voltaje suministrado entre A y B simula la diferencia de potencial (de 6 m en este caso). Nótese que el efecto del agua de descarga es el establecer una cabeza diferencial h a lo largo del sistema de caminos de flujo. Nuevamente, si se prueba en busca de un voltaje particular, puede establecerse el lugar geométrico de los puntos que definen una línea equipotencial. Los caminos de flujo pueden ser dibujados al ojo utilizando los conceptos convencionales de construcción de red de flujo, es decir, tratando de establecer cuadrados para completar la red de flujo del sistema.

Para problemas de los tipos mostrados en las Figs. 20-3 y 20-4, las condiciones de frontera de aguas arriba y aguas abajo (grandes distancias de $L \rightarrow \infty$) pueden aproximarse utilizando una longitud de modelo de 3 a 6 veces mayor que la altura A del espesor del estrato. La longitud apropiada puede verificarse observando la intersección de las líneas equipotenciales con la frontera del fondo. O sea, si la intersección de las líneas equipotenciales

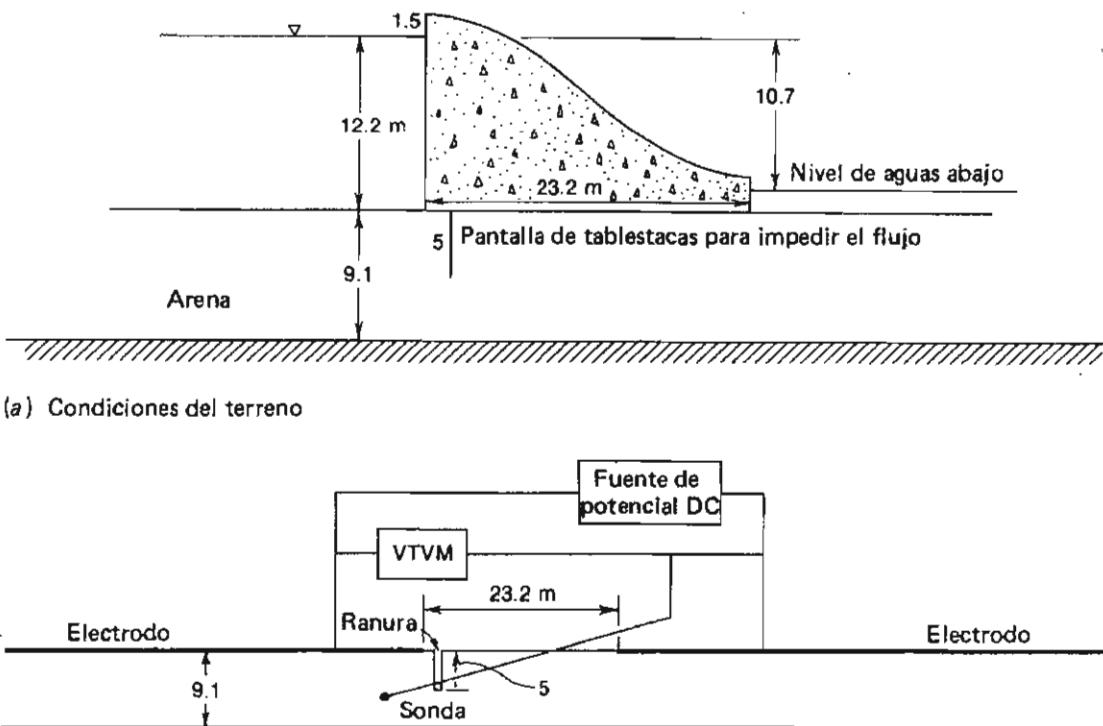


Figura 20-4

Presa de concreto sobre fundación permeable con pantalla impermeable de Tablestacas.

no es una curva suave y ángulos rectos, la long. del modelo no es adecuada para el espesor del estrato de suelo permeable.

Si la tablestaca es permeable, es posible simular la situación utilizando un corte ranurado en lugar de un corte completo. Si el suelo es estratificado, o si existen cambios en el coeficiente de permeabilidad k , esto puede simularse aumentando o decreciendo la conductancia del papel agregando (añadir una ligera capa de pintura) o removiendo (perforar agujeros) electrolito de corte en las zonas adecuadas. Estas técnicas de "ensayo y ajuste" pueden utilizarse para obtener rangos posibles de flujo esperado de agua-especialmente en vista del hecho de la incertidumbre tan considerable que existe en la determinación del coeficiente de permeabilidad de un suelo.

El papel Teledeltos es un material excelente para utilizarlo en cortes para analogía eléctrica. Este papel tiene una cubierta de grafito y se ha encontrado que su conductividad puede variar ligeramente en las direcciones x e y . Sin embargo, para la solución de la mayoría de los problemas de suelos, cualquier diferencia en conductividad tiene sólo importancia académica. Lo anterior es especialmente cierto cuando se considera el grado de precisión asociado con la determinación del coeficiente de permeabilidad del suelo.

Para simular el agua en contacto en más de un punto de cualquier frontera, es necesario pintar un electrodo de la longitud apropiada en el corte de papel, de forma que la corriente eléctrica simule el agua que entra y sale de la masa de suelo. Los electrodos deben ser altamente conductivos con respecto al papel, y la pintura de plata (base de plata) es de gran utilidad para este propósito. Podría recurrirse a fijar láminas de metal al corte de papel, pero este procedimiento usualmente origina un modelo bastante difícil para trabajar, siendo preferibles las pinturas de plata. Los electrodos deben pintarse tan rectos como sea posible y deben utilizarse como tiras relativamente delgadas debido al factor de reducción ya involucrado en el modelo de pequeña escala con respecto a la simulación de la situación del terreno.

El papel Teledeltos posee cualidades de conductividad errática cuando se le perfora, se le tuerce o arruga. Por consiguiente debe ser manipulado y almacenado cuidadosamente.

Si $k_x \neq k_y$, de la teoría de redes de flujo se puede recordar que las dimensiones x e y pueden modificarse utilizando las siguientes transformaciones:

$$x' = x \sqrt{\frac{k_x}{k_y}}$$

ó

$$y' = y \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

Si se hacen estas transformaciones, se pueden utilizar cuadrados para dibujar las redes de flujo. Para el corte o molde de papel para la analogía eléctrica deben ajustarse las dimensiones, utilizando la ecuación de transformación apropiada de las mencionadas arriba para cortar el molde.

Procedimiento

1. Cada estudiante deberá hacer un molde a escala utilizando las Figs. 20-1p, 20-2p, ó 20-3p, según le indique el instructor, con el papel Teledeltos suministrado.
2. Pintar cuidadosamente los electrodos sobre el molde utilizando la pintura suministrada para electrodos. Usar las localizaciones apropiadas para los electrodos de forma que se puedan determinar las líneas equipotenciales.
3. Establecer un voltaje conveniente a través de los electrodos y el corte y con la sonda del VTVM, localizar por lo menos 10 líneas en el modelo. Marcar ligeramente el lugar geométrico de los puntos haciendo unos pequeños círculos con lápiz, *teniendo mucho cuidado de no perforar el papel*. Recordar que cualquier agujero cambia la conductividad (coeficiente de permeabilidad) del modelo eléctrico.
4. Hacer el trazo del corte y de localización de las líneas equipotenciales y completar la construcción de la red de flujo completando a mano alzada los canales de flujo. Calcular la cantidad de flujo $\text{X m de estructura X día}$.
5. Volver a hacer el problema asignado en el paso 1 dibujando a mano la red de flujo, tanto para equipotenciales como para canales de flujo. No es necesario preocuparse por la ejecución de un dibujo excesivamente detallado; hasta con un bosquejo (a escala, por supuesto) que no "se vea muy mal" y calcular el flujo por metro de estructura por día como en el paso 4.
6. Comparar los resultados de los pasos 4 y 5, comentar cualquier diferencia significativa. Asegurarse de incluir en el informe el molde de papel montado en un papel grueso o en una cartulina de forma que no se doble ni pierda.

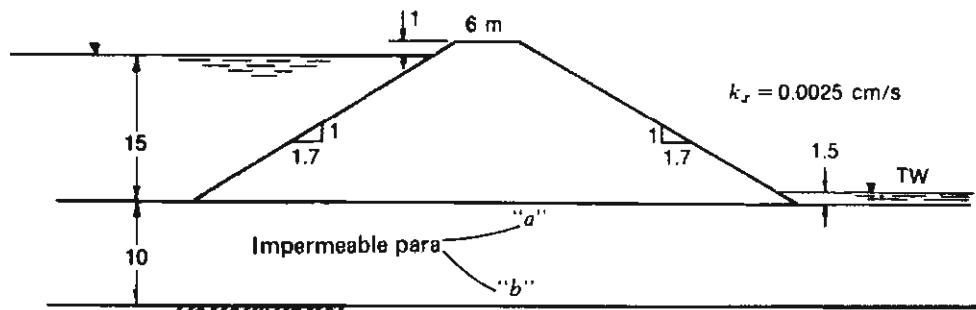


Figura 20-1p

No está a escala.

- (a) Encontrar la cantidad de flujo en $\text{m}^3/\text{m}/\text{día}$ para la estructura mostrada si se coloca sobre una base *impermeable*. (b) Encontrar la cantidad de flujo en $\text{m}^3/\text{m}/\text{día}$ para la estructura mostrada si está colocada sobre base permeable con el mismo coeficiente de permeabilidad del material de la presa. (c) Repetir (a) con $k_y = 0.25 k_x$ donde k_x es el valor mostrado en la Fig. 20-1p.

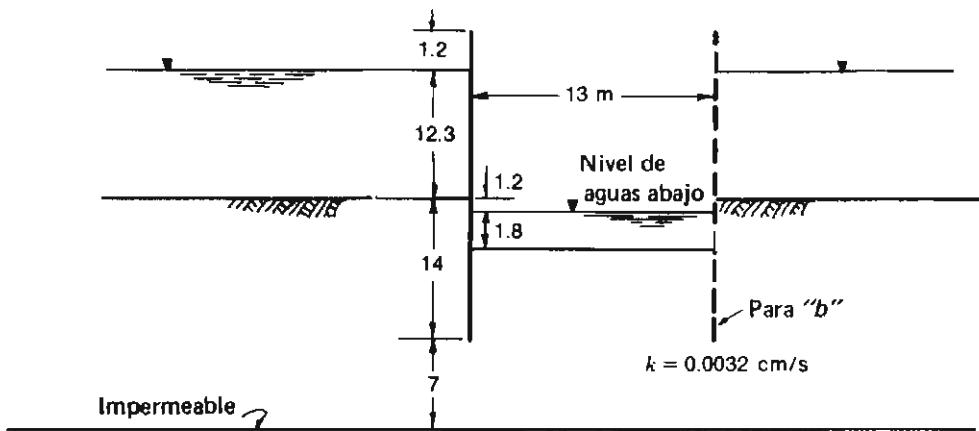


Figura 20-2p

No está a escala.

- (a) Encontrar la cantidad de flujo en $\text{m}^3/\text{m}/\text{día}$ que ocurre por debajo del muro de tablestacas de la izquierda únicamente. (b) Encontrar la cantidad de flujo en $\text{m}^3/\text{m}/\text{día}$ para la situación de ataguía mostrada en caso de existir muros de tablestacas a ambos lados.

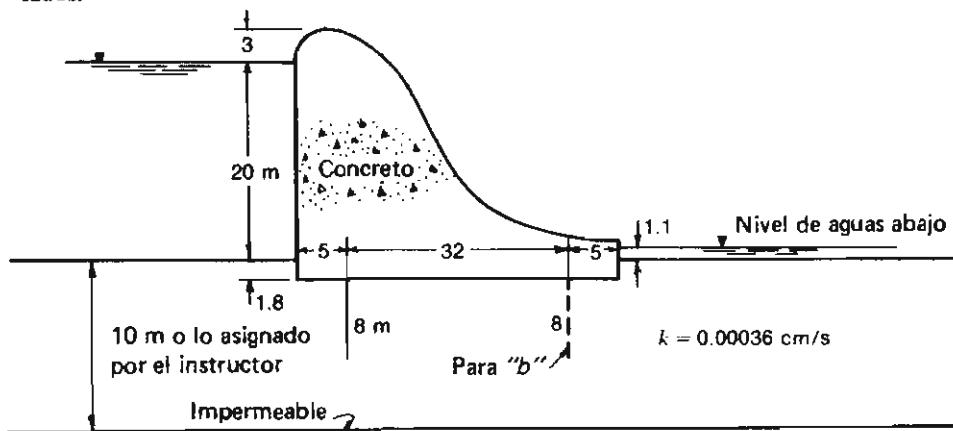


Figura 20-3p

No está a escala.

- (a) Encontrar la cantidad de flujo en $\text{m}^3/\text{m}/\text{día}$ que pasa bajo la presa mostrado cuando la pantalla de tablestacas se encuentra en la localización *aguas arriba* (línea continua). (b) Encontrar la cantidad de flujo en $\text{m}^3/\text{m}/\text{día}$ que pasa bajo la presa mostrada, cuando la pantalla de tablestacas se encuentra en el sitio *aguas abajo* (línea punteada). (c) Encontrar la cantidad de flujo en $\text{m}^3/\text{m}/\text{día}$ que ocurre bajo la presa mostrada cuando existen pantallas de tablestacas en *ambos* sitios.

Experimento N° 21 **RELACIONES VOLUMETRICAS — GRAVIMETRICAS**

Referencias

Principio de Arquímedes según el cual un cuerpo sumergido en un líquido desplaza su propio volumen, como se encuentra en cualquier texto de física.

Objetivo

Introducir al estudiante al concepto de pesos unitarios seco y saturado, relación de vacío, estructura de suelo (estado), y a un método para calcular la gravedad específica de material de grano grueso.

Equipo

Recipiente grande de lados rectos y volumen conocido¹

Regla metálica

Cantidad de grava arenosa secada al horno (de por ejemplo, 2 a 20 mm)

Balanza

Cilindro graduado 500 a 1000 mililitros.



Figura 21-1

Equipo para determinar las relaciones volumétricas-gravimétricas. Vaso de batería, lleno, sobre la balanza de 20 kg, probeta graduada de 1000 ml con agua para echar en la grava que se encuentra en el vaso de batería después de determinar el peso unitario seco inicial. Nótese que el volumen de los vasos se determinó y marcó sobre el mismo para ganar tiempo.

Procedimiento

1. Cada grupo debe pesar cuidadosamente el recipiente vacío y llenarlo con suelo, enrasar

¹ El autor sugiere utilizar un jarro de batería de dimensiones de 10 cm de diámetro por 15 cm de altura (volumen aproximado de 1200 cm^3), ó, 15 cm de diámetro X 15 cm de altura (volumen aproximado de 2400 cm^3) fácilmente adquiribles en compañías de suministros de laboratorios. También es posible utilizar recipientes redondos de almacenamiento de café o azúcar en la cocina si son plásticos, de forma que se pueda observar a través de sus paredes el estado de suelo y la presencia de burbujas de aire atrapadas.

cuidadosamente la superficie y pesar. Si el volumen del suelo cambia debido a vibraciones en el proceso de pesaje, se introducen cambios en el estado (estructura del suelo) del material. Añadir suelo adicional, volver a pesar y/o repetir tantas veces sea necesario para eliminar las vibraciones que causen cambio en el volumen del material. Registrar el peso final del recipiente con suelo en el sitio adecuado del formato provisto.

2. Llenar el cilindro graduado con agua del grifo a temperatura estabilizada (dejar correr el agua del grifo suficientemente hasta que salga agua fría, aproximadamente a 20°C). Echar agua cuidadosamente en el recipiente de suelo, por los lados y lentamente, para evitar que se atrape demasiado aire en los vacíos del suelo. Llenar el recipiente hasta el nivel superior sin permitir que el agua se desborde y se pierda. Tener cuidado al llenar de agua hasta el tope, en no incurrir en el "redondeo" debido a la acción del menisco. Observar los lados del recipiente a medida que se llena y si aparecen burbujas de aire atrapadas, se debe balancear el recipiente suavemente o golpear ligeramente en el sitio donde se encuentra la burbuja para desalojarla. Se debe tener mucho cuidado en no introducir un cambio en el estado del suelo en este punto.

Registrar el volumen de agua utilizado para llenar el recipiente de suelo.

3. Colocar cuidadosamente el recipiente lleno sobre la balanza (podría desearse colocar el recipiente parcialmente lleno con agua en la balanza, una vez allí terminar el llenado, teniendo mucho cuidado en mantener el nivel del recipiente de forma que se encuentre completamente lleno de agua al final de la operación).

Registrar el peso de suelo más agua más recipiente. Comparar la diferencia en peso con los mililitros de agua añadidos. La diferencia debe ser del orden de 2 a 5 g; si es más que esto se debe verificar el cilindro graduado y/o las operaciones de peso realizadas.

Cálculos

1. Calcular la densidad como:

$$\gamma_d = \frac{\text{peso del suelo seco}}{\text{volumen del recipiente}} \quad \text{g/cm}^3 \quad (21-1)$$

$$\gamma_d = \text{g/cm}^3 \times 9.807 \quad \text{kN/m}^3 \quad (21-2)$$

2. Calcular peso unitario saturado como:

$$\gamma_{sat} = \frac{\text{peso del suelo saturado}}{\text{volumen del recipiente}} \quad \text{g/cm}^3 \quad (21-3)$$

$$\gamma_{sat} = \text{g/cm}^3 \times 9.807 \quad \text{kN/m}^3 \quad (21-4)$$

3. Calcular la relación de vacíos como sigue

Calcular V_s = volumen del recipiente — volumen del H₂O cm³

Calcular el volumen de vacíos V_v = volumen del H₂O (ml ≈ cm³)

Calcular la relación de vacíos e como:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (21-5)$$

4. Calcular la gravedad específica de los sólidos del suelo G_s como:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (21-6)$$

Consultar el experimento No. 7 para los valores típicos de G_s y compararlo con el valor encontrado.

El informe

1. Preparar un bosquejo a mano alzada (diagrama de fase) donde se muestren todos los volúmenes y pesos.
2. Comentar las limitaciones del cálculo de G_s de esta forma. ¿Por qué se ha limitado tanto el tamaño de partículas del suelo?
3. Comentar sobre las mejoras que puedan hacerse al ensayo tales como: sería mejor utilizar unas pocas gotas de agente remojante en el agua para reducir la formación de burbujas de aire en el suelo o la superficie interior del recipiente. ¿Cuánto afecta los resultados el tamaño de volumen del recipiente? ¿Cuál es el error introducido al no utilizar agua destilada y/o agua deaireada a 4° en lugar de utilizar agua del grifo a 20°C?
4. Derivar la constante 9.807 utilizada para convertir de g/cm^3 a kN/m^3 . Poner la información anterior en un folder con una página de presentación y presentarlo en la fecha designada.

RELACIONES VOLUMETRICAS-GRAVIMETRICAS**Formato 24**

Proyecto _____

Localización del proyecto _____

Descripción del suelo _____

Realizado por _____ Fecha _____

Volumen del recipiente, V_c = _____ cm^3

Peso de suelo seco + recipiente = _____ g

Peso de suelo + agua + recipiente = _____ g

Peso del recipiente = _____ g

Peso del suelo seco, W_s = _____ gPeso del suelo saturado, W_t = _____ gVolumen de agua usada para saturar el suelo, V_w = _____ ml

Calcular:

$$V_d = V_c - V_w = \text{_____} = \text{_____} = \text{_____} \text{ cm}^3$$

$$\gamma_d = \text{_____} = \text{_____} \text{ g/cm}^3 \times 9.807 = \text{_____} \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{sat} = \text{_____} = \text{_____} \text{ g/cm}^3 \times 9.807 = \text{_____} \text{ kN/m}^3$$

$$e = \text{_____} = \text{_____}$$

$$G_s = \text{_____} = \text{_____}$$

Experimento N° 22

PESO UNITARIO DE SUELOS COHESIVOS

Referencias

ASTM D2937-71

Objetivo

Introducir al estudiante a un método rápido de determinación del peso unitario de un suelo cohesivo.

Equipo

Recipiente de volumen conocido (tal como un frasco de envase de 1/4 (o un litro) o un frasco vacío de mayonesa)

Balanza con precisión de 0.1 g

Cilindro graduado (500 ml o mayor)

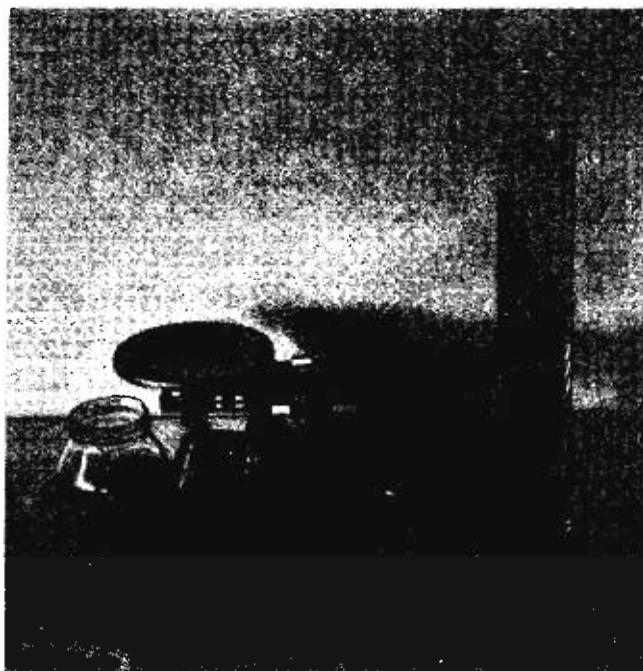


Figura 22-1

Equipo para determinación rápida y simple del peso unitario de un suelo cohesivo. El volumen del frasco mostrado es de 969 cm^3 . La balanza pequeña es (usualmente) suficiente para la determinación de pesos necesarios. Usar una probeta graduada de mínimo 500 ml para el tamaño de este frasco volumétrico (se muestra una de 1000 ml). Usar una muestra de suelo suficientemente grande para que la aproximación en la lectura de la probeta graduada no afecte materialmente los resultados (o usar la diferencia en pesos para el volumen de agua en la probeta).

Generalidades

Este procedimiento puede utilizarse para obtener el volumen desplazado de cualquier suelo cohesivo que no se destruya por estar dentro del agua de 1 a 2 min requeridos para hacer el ensayo. No es aplicable a material poroso o a suelo muy seco, a menos que se encuentre en un alto estado de densidad ya que una absorción apreciable de agua por capilaridad o por cualquier otra forma puede afectar los resultados. Para un gran número de suelos este

procedimiento es adecuado, rápido y económico. Es aplicable para suelos localizados a ciertas profundidades dentro del terreno; en el caso de suelos muy superficiales pueden utilizarse los métodos del experimento No. 10.

Procedimiento

1. Determinar el volumen del recipiente volumétrico como V_c .
2. Obtener una muestra de tubo (de ser posible) de suelo cohesivo.¹ Obtener una muestra que no contenga agujeros evidentes.
3. Pesar cuidadosamente la muestra para obtener W_t .

Para mejores resultados las muestras deben pesar entre 400 y 700 g. Colocar la muestra en el recipiente volumétrico sin romperla.

4. Llenar el cilindro graduado con agua del grifo a temperatura estabilizada (aproximadamente 20°C, dejando salir el agua del grifo durante un buen tiempo). A continuación llenar rápidamente el frasco volumétrico que contiene la muestra de suelo y registrar el volumen de agua utilizado como V_w . Vaciar rápidamente el recipiente volumétrico, retirar la muestra de suelo y secar superficialmente con toallas de papel y volver a pesar. Si los pesos inicial y final se encuentran dentro de una aproximación de 1 a 2 g, el ensayo es bastante satisfactorio — una aproximación mayor requiere juicio de aceptación del ensayo.

Calcular el volumen de la muestra como:

$$V_s = V_c - V_w$$

5. Colocar el suelo húmedo en un recipiente y secarlo al horno durante la noche para obtener W_s (a menos que se conozca el contenido de humedad del suelo).
6. Calcular las densidades húmeda y seca del suelo como sigue:

$$\gamma_{\text{húmeda}} = \frac{W_t}{V_s} \times 9.807 \quad \text{kN/m}^3 \quad (22-1)$$

$$\gamma_{\text{seco}} = \frac{W_s}{V_s} \times 9.807 \quad \text{kN/m}^3 \quad (22-2)$$

El informe

1. Completar los formatos y mostrar las densidades.
2. Comentar las limitaciones del ensayo tales como:
 - a. Cuándo no es aplicable.
 - b. Si es factible utilizar otro líquido diferente del agua.
 - c. Tamaño de la muestra y/o preparación alternativa de la muestra (cubrimiento de grasa o cualquier otro tipo de recubrimiento).
3. Poner el proyecto en un folder con una hoja de presentación y entregarlo en la fecha acordada.

¹Cuando no sea fácil disponer de una muestra de tubo (laboratorios para estudiantes), el autor sugiere utilizar un conjunto de muestras hechas con anterioridad al período de laboratorio por medio del Equipo de Compactación Harvard Miniatura (ver Exp. No. 9) o alguna modificación de él para producir las muestras de volumen y densidad conocidos.

PESO UNITARIO DE UN SUELO COHESIVO

Formato 25

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____

Descripción del suelo _____

Realizado por _____ Fecha _____

Perforación No. _____ Perforación No. _____

Profundidad _____ Profundidad _____

Peso de la muestra, W_t = _____ gPeso de la muestra, W_t = _____ gVol. del recipiente, V_c = _____ cm³Vol. del recipiente, V_c = _____ cm³

Lectura inicial de la probeta graduada = _____ ml

Lectura inicial de la probeta graduada = _____ ml

Lectura final de la probeta graduada = _____ ml

Lectura final de la probeta graduada = _____ ml

Volumen de agua, V_w = _____ mlVolumen de agua, V_w = _____ mlVolumen de suelo, V_s = _____ cm³Volumen de Suelo, V_s = _____ cm³

Densidad húmeda:

Densidad húmeda:

$$\gamma_{\text{húmeda}} = W_t/V_s = \text{_____ g/cm}^3$$

$$\gamma_{\text{húmeda}} = W_t/V_s = \text{_____ g/cm}^3$$

$$\gamma_{\text{húmeda}} = \text{g/cm}^3 \times 9.807 = \text{_____ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{húmeda}} = \text{gm/cm}^3 \times 9.807 = \text{_____ kN/m}^3$$

Cálculo del peso unitario secoContenido de humedad, $w\%$ = _____Contenido de humedad $w\%$ = _____

$$\gamma_{\text{seco}} = \frac{\gamma_{\text{húmeda}}}{1 + w} = \text{_____ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{seco}} = \frac{\gamma_{\text{húmeda}}}{1 + w} = \text{_____ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{seco}} = W_s/V_s = \text{_____ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{seco}} = W_s/V_s = \text{_____ kN/m}^3$$

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Formato 1

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____

Descripción del suelo _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Fecha de pesaje _____

Perforación No.					
Recipiente No. (lata)					
Peso de lata + suelo húmedo					
Peso de lata + suelo seco					
Peso de lata					
Peso de suelo seco					
Peso de agua					
Contenido de humedad %					

Perforación No.					
Recipiente No. (lata)					
Peso de lata + suelo húmedo					
Peso de lata + suelo seco					
Peso de lata					
Peso de suelo seco					
Peso de agua					
Contenido de humedad %					

Formato 2

Proyecto y localización _____

Capataz _____ **Ayudante** _____ **Nivel de Agua** _____ a _____ hrs. **Trabajo No.** _____

Equipo de perforación _____ Revestimiento usado _____ Fecha _____

Elevación de la superficie _____ Tamaño del muestrador _____ Peso del martillo _____ Hoja _____ de _____

Perforación No. _____ Clima _____ Temp. _____

DETERMINACION DE LIMITES DE ATTERBERG

Formato 3

Proyecto _____ Trabajo No. _____

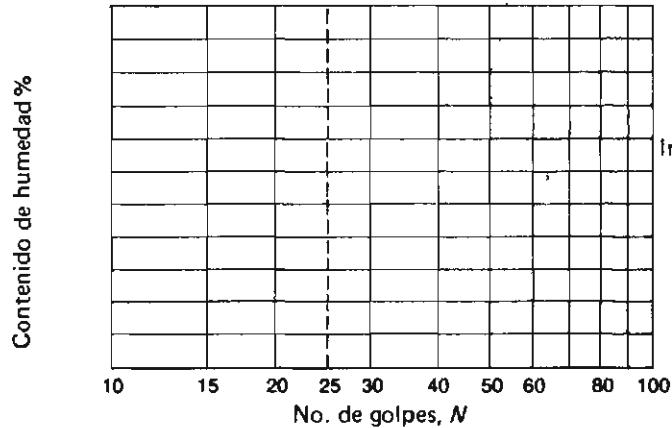
Localización del proyecto _____ Perforación No. _____ Muestra No. _____

Descripción del suelo _____

Profundidad de la muestra _____ Realizado por _____ Fecha _____

Determinación del límite líquido

Lata No.							
Peso de suelo húmedo + lata							
Peso de suelo seco + lata							
Peso de lata							
Peso de suelo seco							
Peso de agua							
Contenido de humedad %							
Número de golpes, N							

Índice de flujo F_f = _____

Límite líquido = _____

Límite plástico = _____

Índice de plasticidad I_p = _____*Determinación del límite plástico*

Lata No.					
Peso de suelo húmedo + lata					
Peso de suelo seco + lata					
Peso de lata					
Peso de suelo seco					
Peso de agua					
Contenido de humedad %					

ENSAYO DE LIMITE DE CONTRACCION

Formato 4

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____ Perforación No. _____ Muestra No. _____

Descripción del suelo _____ Profundidad de la muestra _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Peso del plato recubierto + suelo húmedo = _____ g

Peso del plato recubierto + suelo seco = _____ g

Peso del plato recubierto = _____ g

Peso del suelo, W_s = _____ gPeso del agua, W_a = _____ gContenido de humedad, W_0 % = _____Vol. del Suelo Húmedo, V_0 = _____ cm³ (Paso 5 del procedimiento : Vol. del plato de contracción = V_0)Vol. del Suelo Seco, V_f = _____ cm³ (Paso 5 del procedimiento)

$$\text{Límite de Contracción, } w_s = W_0 - \frac{(V_0 - V_f) \gamma_w}{W_s} \times 100 = \text{_____}$$

$$\text{Relación de Contracción, SR} = W_s/V_f = \text{_____}$$

ANALISIS GRANULOMETRICO-MECANICO

Formato 5

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____ Perforación No. _____ Muestra No. _____

Descripción del suelo _____ Profundidad de la muestra _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____.

Tamaño de la Muestra de Suelo (ASTM D1140-54)

Diámetro nominal de la partícula mayor	Peso mínimo aproximado de muestra, g
Tamiz No. 10	200
Tamiz No. 4	500
3/4 pulg.	1500

Peso de la muestra seca+recipiente	
Peso del recipiente	
Peso de la muestra seca, W_s	

Análisis por tamizado y forma de granos

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \sum \% \text{ retenido.}$$

DISTRIBUCION GRANULOMETRICA

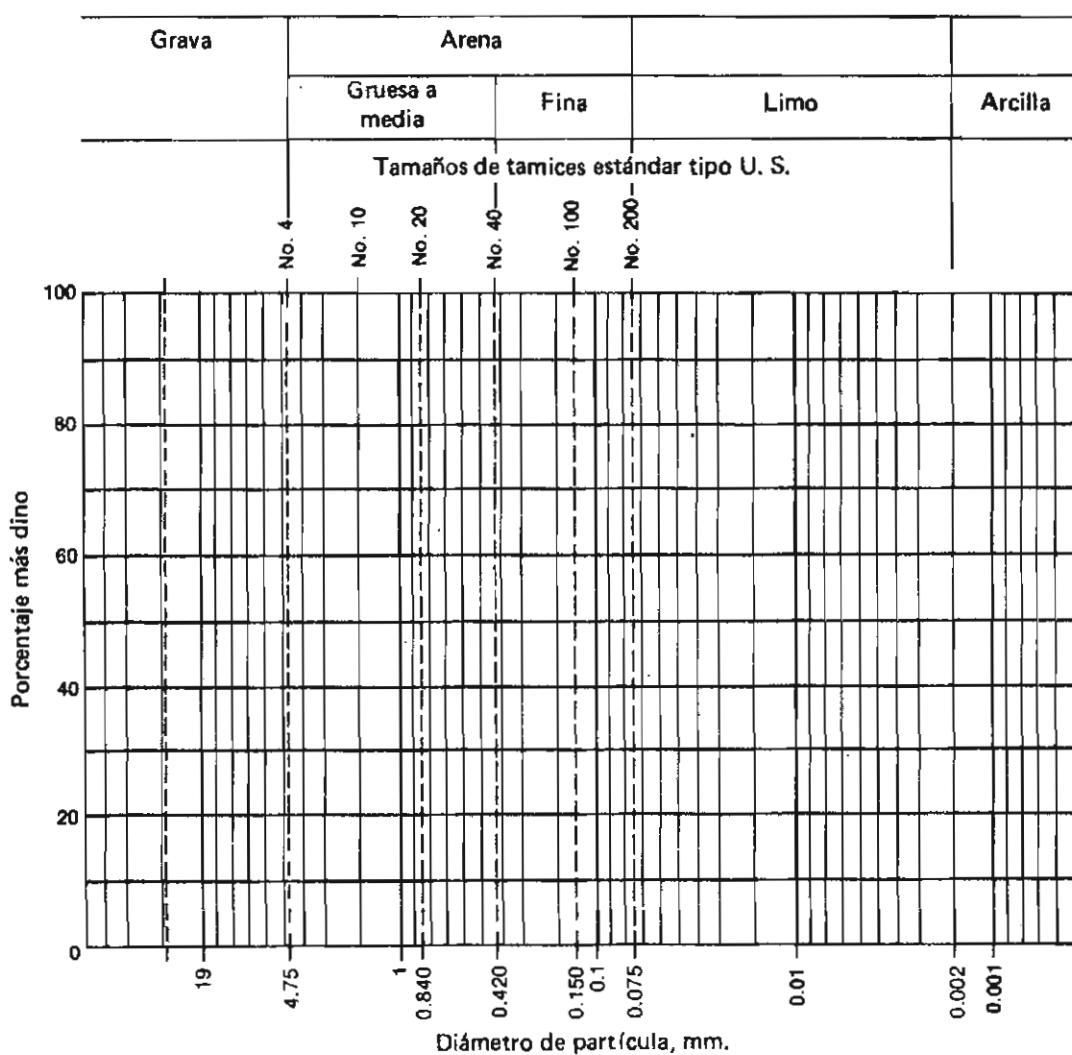
Formato 6

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____ Perforación No. _____ Muestra No. _____

Descripción del suelo _____ Profundidad de la muestra _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____



Descripción visual _____

Clasificación del suelo _____

Sistema _____

ANALISIS GRANULOMETRICO–METODO DEL HIDROMETRO

Formato 7

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Trabajo No.

Localización del proyecto _____ **Perforación No.** _____ **Muestra No.** _____

Perforación No. Muestra No.

Descripción del suelo

Profundidad de la muestra

Realizado por _____ **Fecha de la práctica** _____

Fecha de la práctica

Análisis de hidrómetro

Hidrómetro No. _____ **G. de los sólidos =** _____ **a =** _____

Agente Dispersante _____ **Cantidad** _____ **Peso de suelo *W*** _____

Corrección de cero _____ **Corrección de menisco** _____

$$R_c = R_{\text{real}} - \text{corrección de Cero} + C_r$$

$$\% \text{ más fino} = R_c(a)/W_s$$

$$D = K \sqrt{L/t}$$

GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS (G_s)

Formato 8

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____ Perforación No. _____ Muestra No. _____

Descripción del suelo _____ Profundidad de la muestra _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Ensayo No.				
Vol. del frasco a 20°C				
Método de remoción del aire ^a				
Peso frasco + agua + suelo = W_{bws}				
Temperatura, °C				
Peso frasco + agua ^b = W_{bw}				
Plato evaporador No.				
Peso plato evap. + suelo seco				
Peso plato evap.				
Peso del suelo seco = W_s				
$W_s = W_s + W_{bw} - W_{bws}$				
$G_s = \alpha W_s / W_w$				

^aIndicar si se usó vacío o aspiradora para remoción de aire.^b W_{bw} es el peso del frasco lleno con agua a la misma temp. $\pm 1^\circ\text{C}$ a la cual se registró W_{bws} o un valor tomado de la curva de calibración a la temperatura T de W_{bws} .

Observaciones _____

Gravedad específica promedio de los sólidos del suelo (G_s) = _____

CLASIFICACION DEL SUELO**Formato 9**

Proyecto _____

Localización del proyecto _____

Realizado por _____ Fecha _____

Identificación del suelo (No. del recipiente, etc.) _____

Análisis por tamizado (húmedo, seco)

Tamiz	% más fino	Propiedades Índices
No. 4	_____	$w_L =$ _____
No. 10	_____	$w_P =$ _____
	_____	$I_P =$ _____
No. 40	_____	_____
	_____	$C_U =$ _____
No. 100	_____	$C_c =$ _____
No. 200	_____	

Clasificación (escribir la descripción) _____

Símbolos: AASHTO: _____ Unificada: _____

Identificación del suelo (No. del recipiente, etc.)

Análisis por tamizado (húmedo, seco)

Tamiz	% más fino	Propiedades Índices
No. 4	_____	$w_L =$ _____
No. 10	_____	$w_P =$ _____
	_____	$I_P =$ _____
No. 40	_____	_____
	_____	$C_U =$ _____
No. 100	_____	$C_c =$ _____
No. 200	_____	

Clasificación (escribir la descripción) _____

Símbolos: AASHTO: _____ Unificada: _____

ENSAYO DE COMPACTACION

Formato 10

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____ Perforación No. _____ Muestra No. _____

Descripción del suelo _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

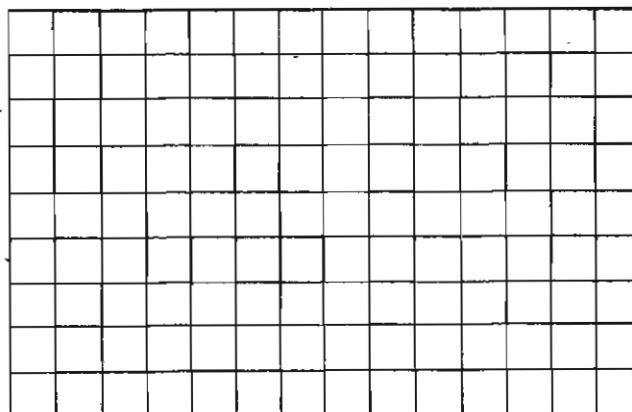
Golpes/Capa _____ No. de Capas _____ Peso del martillo _____ N

Dimensiones del molde: Diam. _____ cm Altura _____ cm Vol. _____ cm³*Determinación del contenido de humedad*

Muestra No.	1	2	3	4	5	6
Lata de humedad No.						
Peso de lata + suelo húmedo						
Peso de lata + suelo seco						
Peso del agua						
Peso de la lata						
Peso del suelo seco						
Contenido de humedad, w %						

Determinación de la densidad

Contenido de humedad deseado						
Contenido de humedad, w %						
Peso de suelo + molde						
Peso del molde						
Peso de suelo seco en molde, g						
Densidad húmeda, kN/m ³						
Densidad seca, γ_d , kN/m ³						

Densidad seca, kN/m³

Contenido de humedad, w %

Contenido de humedad óptimo

%

Densidad seca máxima =

kN/m³

ENSAYO DE DENSIDAD DE TERRENO (Como de arena, balón)

Formato 11

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____

Descripción del suelo _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Datos de laboratorio del ensayo de terreno

Método del Cono de Arena

Método del balón

Peso de lata + suelo húmedo _____ Peso de lata + suelo húmedo _____

Peso de la lata _____ Peso de la lata _____

Peso del suelo húmedo, W' _____ Peso del suelo húmedo, W' _____

Peso de suelo húmedo + bandeja _____ Peso de suelo húmedo + bandeja _____

Peso de suelo seco + bandeja _____ Peso de suelo seco + bandeja _____

Peso de la bandeja _____ Peso de la bandeja _____

Peso del suelo seco _____ Peso del suelo seco _____

Contenido de humedad, $w\%$ _____ Contenido de humedad, $w\%$ _____*Datos del terreno*

Método del cono de arena

Método del balón

Tipo de arena usada _____ Factor de corrección CF _____

Peso unitario de la arena, γ_{arena} = _____ g/cm³ Lectura final de la escala _____ cm³Peso de frasco + cono después de usarlo _____ g Lectura inicial de la escala _____ cm³Peso de arena usada (hueco + cono) _____ g Vol. del hueco, V'_h _____ cm³Peso de frasco + cono antes de usarlo _____ g Vol. del hueco = V'_h (CF) _____ cm³

Peso de arena en cono (de la calibración) _____ g

Peso de arena en el hueco, W _____ gVol. del hueco, V_h = W/γ_{arena} _____ cm³*Densidad del suelo*Densidad húmeda γ_{humeda} = W'/V_h _____ kN/m³ Densidad seca γ_d = $\gamma_{humeda}/(1+w)$ _____ kN/m³

ENSAYO DE DENSIDAD DE TERRENO**Formato 12**

Nombre _____ Fecha de la práctica _____

Datos de calibración**I. Método del cono de arena****A. Determinación de la densidad de la arena**

Arena usada _____

Tipo de medida de Vol. _____ Vol., V_m _____ cm^3

Peso de arena para llenar el Vol. medido: Intento No. 1 _____

Intento No. 2 _____

Intento No. 3 _____

Peso promedio W_a _____Densidad de la arena, $\gamma_{\text{arena}} = W_a/V_m$ _____ g/cm^3 **B. Peso de arena para llenar el cono**

Peso de frasco lleno + cono = _____

Peso después del intento No. 1 = _____ Peso usado = _____

Peso después del intento No. 2 = _____ Peso usado = _____

Peso después del intento No. 3 = _____ Peso usado = _____

Peso promedio para llenar el cono = _____ g

II. Calibración del volúmetro (aparato de balón)

Tipo de recipiente usado _____

Vol. del recipiente, V_c = _____ cm^3

Lectura inicial _____

Lectura después del intento No. 1 _____; Cambio de volumen _____ cm^3 Lectura después del intento No. 2 _____; Cambio de volumen _____ cm^3 Lectura después del intento No. 3 _____; Cambio de volumen _____ cm^3 Promedio V _____ cm^3 Factor de Corrección $CF = V_c/\Delta V = \dots$ [Si el factor de corrección es menor que ± 0.002 , se puede despreciar]

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (cabeza constante, cabeza variable)

Formato 13

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____

Descripción del suelo _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Dimensiones de la muestra: Diám. _____ cm; Área _____ cm²; Altura _____ cmPeso inicial de suelo + bandeja _____ g Vol. _____ cm³Peso final de suelo + bandeja _____ g Peso unitario _____ kN/m³

Peso de la muestra _____ g

*Cabeza constante**Datos de ensayo**Datos usados del ensayo*

Ensayo No.	<i>t</i> , s	Q, cm ³	T, °C	Ensayo No.	<i>t</i> , s	Q, cm ³	T, °C
1							
2							
3							
4							
Promedio^a							

$$k_T = QL/Aht = \dots$$

$$= \dots \text{ cm/s} \quad k_{20} = k_T \eta_T / \eta_{20} = \dots \text{ cm/s}$$

Cabeza variable

Tubería = bureta, otra (especificar) _____

Área de la tubería, *a* = _____ cm²*Datos del ensayo^b**Datos usados del ensayo*

Ensayo No.	<i>h₁</i> , cm	<i>h₂</i> , cm	<i>t</i> , s	Q ₁ , cm ³	Q ₂ , cm ³	T, °C	Ensayo No.	<i>h₁</i> , cm	<i>h₂</i> , cm	<i>t</i> , s	T, °C
1											
2											
3											
4											
Promedio											

$$\eta_T / \eta_{20} = \dots$$

$$k_T = \frac{aL}{At} \ln h_1 / h_2 = \dots = \dots \text{ cm/s}$$

$$k_{20} = k_T \eta_T / \eta_{20} = \dots = \dots \text{ cm/s}$$

^aUsar valores promedio únicamente si existe muy poca diferencia en la temperatura del ensayo, por ejemplo, 1–2°C.^bEste ensayo puede simplificarse considerablemente usando los mismos valores *h₁* y *h₂* cada vez, de otra forma es imposible promediarios independientemente de *T*.

ENSAYO DE CONSOLIDACION

Formato 14

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización _____ Perforación No. _____ Muestra No. _____

Descripción del suelo _____ Profundidad de la muestra _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Consolidómetro tipo _____ Anillo No. _____

Relación de amplificación del sistema de carga _____

Dimensiones del anillo: Diám. _____ Área, A _____ Altura _____

Altura inicial del suelo, H_i _____Gravedad específica del suelo, G_s = _____

Peso del anillo + muestra al comienzo del ensayo = _____

Peso del anillo = _____

Peso del suelo húmedo, W_i = _____Peso de suelo seco calculado, W'_s = _____Peso de suelo seco al horno, aW_s = _____Altura de sólidos calculada^b, H_s = _____Altura inicial de vacíos, $H_v = H_i - H_s$ = _____Grado de saturación inicial, $S_i = (W_y - W_s)/(H_v A)$ = _____Relación de vacíos inicial, $e_i = H_v/H_s$ = _____

Datos finales del ensayo (obtenidos al final del ensayo)

Lectura inicial del deformímetro _____

Lectura final del deformímetro _____

Cambio en altura de la muestra _____

Altura final de vacíos, H_{vf} _____Relación de vacíos final, $e_f = H_{vf}/H_s$ _____^aObtenido de los datos finales sobre contenido de humedad.^bUsar G_s o los datos finales de contenido de humedad para $S = 100\%$ ^cAsegurarse de incluir cualquier cantidad de suelo que se haya podido extruir del anillo al consolidómetro.

Determinación del contenido de humedad

Peso de lata + suelo húmedo = _____

Peso de lata + suelo seco = _____

Peso de la lata = _____

Peso del agua = _____

Peso del suelo seco = _____

Contenido de humedad inicial, w_i = _____

Determinación del contenido de humedad final

Peso final del anillo^c _____

Peso final del anillo + suelo seco _____

Peso de suelo seco al horno, W_s _____Contenido de humedad final, w_f _____Grado de saturación final, S _____ %

ENSAYO DE CONSOLIDACION (Datos de compresión–tiempo)

Formato 15

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____ **Perforación No.** _____ **Muestra No.** _____

Descripción del suelo _____ **Profundidad de la muestra** _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Datos del ensayo de carga

Carga _____ kPa

Carga _____ kPa

Fecha de aplicación

Fecha de aplicación _____

Aplicada por _____

Aplicada por _____

*Poner aquí las subdivisiones del deformímetro, 0.01 mm/div., etc.

ENSAYO DE CONSOLIDACION (Hoja de cálculos para e y C_v)

Formato 16

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____ **Perforación No.** _____ **Muestra No.** _____

Descripción del suelo _____ **Profundidad de la muestra** _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Datos de la muestra

Vol. inicial de la muestra, V_i = _____ Peso seco de sólidos del suelo, W_s = _____

$$\text{Gravedad específica del suelo, } G_s = \text{ Altura de sólidos, } H_s =$$

$$\text{Altura inicial de vacíos, } H_i = \text{Relación de vacíos inicial, } e_i =$$

Nota: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

Nota: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

b) Usar deformación unitaria o relación de vacío (o ambos)

CAltura promedio del incremento = Altura inicial - $\frac{1}{n} \Delta H$

Altura promedio del incremento = Altura inicial - $\frac{dH}{2}$

De la curva de deformación vs. log τ

• De la curva de deformación vs. $\log t$

ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA TIPO DE MUESTRA (INALTERADA, REMOLDEADA)

Formato 17

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____

Descripción del suelo _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Datos de la muestra

Diám. _____ Área, A_0 _____ Altura, L_0 _____

Vol. _____ Peso _____ Peso unitario húmedo _____

Contenido de humedad, w % _____ **Peso unitario seco** _____ **LRC** _____

Nota: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

Resistencia a la compresión inconfinada q_u _____ **Cohesión** = $q_u/2$ = _____

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL (Cohesivos, No Cohesivos)

Formato 18

Proyecto _____ Trabajo No. _____
Localización _____ Perforación No. _____ Muestra No. _____
Descripción del suelo _____ Profundidad de la muestra _____
Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Llenar los vacíos con los datos y unidades adecuadas.

Datos de la muestra

Dimensiones de la muestra: Diám. D_0 = _____ Área, A_0 = _____ L_0 = _____
Vol. V_0 = _____ Contenido de humedad, w = _____ % Grado de saturación, S = _____ %

Peso, W_0 = _____

Para suelos No-cohesivos

Peso inicial de recipiente + arena = _____

Peso final del recipiente + arena = _____

Peso de arena usada en el espécimen, W_a = _____

Gravedad específica de la arena G_s = _____

Vol. de sólidos en la muestra V_s = _____

Vol. de vacíos en la muestra (inicial) V_v = _____

Relación de vacíos inicial de la muestra e_i = _____

Relación de vacíos de la arena en densidad máxima e_{max} = _____

Relación de vacíos de la arena en densidad mínima e_{min} = _____

Densidad relativa de la muestra D_r = _____

Peso unitario de la muestra (cohesiva, no-cohesiva) $\gamma = W_0/V_0$ = _____

Datos de la máquina

Velocidad de carga _____ /min (cm o pulg.)

Los siguientes datos no tienen aplicación si la máquina puede ajustarse para tratar dichos efectos de las lecturas de carga.

Sección transversal del pistón de carga, A_p = _____ cm^2

Carga hacia arriba sobre el pistón = $A_p \sigma_3$ = _____ kg

Peso del pistón de carga = _____ kg

Valor inicial de carga calculado = _____ kg (Si la carga hacia arriba es mayor que el peso del pistón, ignorarlo).

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

Formato 19

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____ **Perforación No.** _____ **Muestra No.** _____

Descripción del suelo _____ **Profundidad de la muestra** _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Datos de la muestra: Área, A_0 = _____ Longitud L_0 = _____

Datos de la máquina: Velocidad de carga = _____ /min Constante del anillo de carga LRC = _____ /div

Nota: introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

El cálculo de esfuerzo desviador mostrado se basa en la tara del sistema de carga, de forma que la lectura del anillo de carga proporcione directamente el valor de la carga desviadora. $\sigma = (\text{Col. 3} \times \text{LRC}) / A^2$.

Datos calculados

Presión lateral sobre la muestra $\sigma_3 = \underline{\hspace{1cm}}$

Esfuerzo desviador máximo (de la curva esfuerzo-deformación) $\sigma =$ _____

$$\sigma_1 = \sigma + \sigma_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL (con registro de presión de poros y/o cambio de volumen)

Formato 20

Proyecto _____ Trabajo No. _____ Localización del proyecto _____

Perforación No. _____ Muestra No. _____ Descripción del suelo _____

Profundidad de la muestra _____ Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Área de la muestra A_0 = _____ Longitud de la muestra L_0 = _____ Presión de confinamiento σ_3 = _____

Velocidad de carga = _____ /min Constante del anillo de carga LRC = _____.

Lectura inicial de la bureta = _____ cm³. Relación de vacíos inicial, e_0 = _____ Vol. de sólidos, V_s = _____

Note: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

^aBasado en la tara del sistema para que la lectura del anillo sea directamente la carga desviadora.

Datos para el círculo de Mohr

Esfuerzo desviador máximo =

$$\text{Esfuerzo principal } \sigma_1 = \underline{\hspace{2cm}}$$

Esfuerzo principal efectivo = _____

ENSAYO DE RELACION DE SOPORTE

Formato 22

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Trabajo No.

Localización del proyecto _____ **Perforación No.** _____ **Muestra No.** _____

Perforación No.

Muestra No.

Descripción del suelo

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Energía de compactación: Martillo _____ N No. de capas _____ Golpes/Capa _____

w de compactación _____ % Diám. del molde _____ Altura de suelo _____ Vol. _____

Peso húmedo

Peso seco del suelo, W_s **γ_{humedo}** **γ_{seco}**

Datos de expansión

Después de la inmersión

Molde No.			
Sobrecarga, N			
Peso inicial de suelo húmedo + molde + base			
Peso final de suelo húmedo + molde + base			
Peso molde + base			
Peso inicial de suelo húmedo, W_i			
Peso de agua absorbida, W_w			
% Agua absorbida = W_w/W_i			

Nota: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

ENSAYO DE RELACION DE SOPORTE

Formato 23

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del proyecto _____ **Perforación No.** _____ **Muestra No.** _____

Descripción del suelo _____

Realizado por _____ Fecha de la práctica _____

Datos del ensayo de carga del CBR (saturado, no saturado, señale la condición aplicable)

Peso unitario húmedo = _____ Peso unitario seco = _____

Note: Introducir las unidades necesarias en los encabezamientos.

RELACIONES VOLUMETRICAS-GRAVIMETRICAS

Formato 24

Proyecto _____

Localización del proyecto _____

Descripción del suelo _____

Realizado por _____ Fecha _____

Volumen del recipiente, V_r = _____ cm³

Peso de suelo seco + recipiente = _____ g

Peso de suelo + agua + recipiente = _____ g

Peso del recipiente = _____ g

Peso del suelo seco, W_s = _____ gPeso del suelo saturado, W_t = _____ gVolumen de agua usada para saturar el suelo, V_r = _____ ml

Calcular:

$$V_t = V_r - V_r = \text{_____} = \text{_____} = \text{_____} \text{ cm}^3$$

$$\gamma_d = \text{_____} = \text{_____} \text{ g/cm}^3 \times 9.807 = \text{_____} \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{sat} = \text{_____} = \text{_____} \text{ g/cm}^3 \times 9.807 = \text{_____} \text{ kN/m}^3$$

$$e = \text{_____} = \text{_____}$$

$$G_t = \text{_____} = \text{_____}$$

PESO UNITARIO DE UN SUELO COHESIVO

Formato 25

Proyecto _____ Trabajo No. _____

Localización del Proyecto _____

Descripción del Suelo _____

Realizado por _____ Fecha _____

Perforación No. _____ Perforación No. _____

Profundidad _____ Profundidad No. _____

Peso de la muestra, W_t = _____ gPeso de la muestra, W_t = _____ gVol. del recipiente, V_c = _____ cm³Vol. del recipiente, V_c = _____ cm³

Lectura inicial de la probeta

Lectura inicial de la probeta

graduada = _____ ml

graduada = _____ ml

Lectura final de la probeta

Lectura final de la probeta

graduada = _____ ml

graduada = _____ ml

Volumen de agua, V_w = _____ mlVolumen de agua, V_w = _____ mlVolumen de suelo, V_s = _____ cm³Volumen de Suelo, V_s = _____ cm³

Densidad húmeda:

Densidad húmeda:

$$\gamma_{\text{húm.}} = W_t/V_s = \text{_____ g/cm}^3$$

$$\gamma_{\text{húm.}} = W_t/V_s = \text{_____ g/cm}^3$$

$$\gamma_{\text{húm.}} = \text{g/cm}^3 \times 9.807 = \text{_____ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{húm.}} = \text{gm/cm}^3 \times 9.807 = \text{_____ kN/m}^3$$

Cálculo del peso unitario secoContenido de humedad, $w\% = \text{_____}$ Contenido de humedad, $w\% = \text{_____}$

$$\gamma_{\text{seco}} = \frac{\gamma_{\text{húm.}}}{1 + w} = \text{_____ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{seco}} = \frac{\gamma_{\text{húm.}}}{1 + w} = \text{_____ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{seco}} = W_s/V_s = \text{_____ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{seco}} = W_s/V_s = \text{_____ kN/m}^3$$

OTROS LIBROS DE INTERES

Bowles, ANALISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES
Bowles, PROPIEDADES GEOFISICAS DE LOS SUELOS
Dunham, CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS
Streeter, MECANICA DE LOS FLUIDOS

ISBN 968-451-046-2

MCGRAW HILL