



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL TOPOGRÁFICA Y  
GEODÉSICA

TÉSIS:

**“MANUAL DE PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO  
DE MECÁNICA DE SUELOS”**

PARA OBTENER ÉL TÍTULO DE: **INGENIERO CIVIL**

PRESENTA: **LINARES GARCÍA BRENDA IVONNE**

DIRECTOR: **M. I. RICARDO RUBÉN PADILLA VELÁZQUEZ**

MÉXICO. D. F.

SEPTIEMBRE 2005

DEDICATORIAS:

EN PRIMER LUGAR DEDICO LA PRESENTE TESIS A DIOS, POR HABERME DADO LA VIDA Y LA CAPACIDAD DE HACER REALIDAD MIS ILUSIONES.

A MIS PADRES: MARGARITA GARCIA MEJIA Y JORGE LINARES BENITEZ POR TODO EL CARIÑO Y APOYO QUE ME HAN BRINDADO EN MI VIDA PERSONAL Y PROFESIONAL.

A MI HERMANA: PERLA LINARES G. POR TODO EL CARIÑO ENTRAÑABLE QUE SIEMPRE NOS HA UNIDO, ASI COMO EL APOYO QUE NOS DIMOS MUTUAMENTE DESDE NIÑAS.

A MI NOVIO: POLO POR TODO EL AMOR, LA CONFIANZA Y EL APOYO QUE ME DA DIA CON DIA, COMO MUJER Y PROFESIONISTA.

# ÍNDICE

Introducción

I. Granulometría

- I.1 Pruebas
- I.2.Observaciones sobre el Procedimiento
- I.3 Cálculos

II. Límites de consistencia

- II.1 Pruebas
- II.2.Observaciones sobre el Procedimiento
- II.3 Cálculos

III. Densidad relativa de sólidos

- III.1 Pruebas
- III.2.Observaciones sobre el Procedimiento
- III.3 Cálculos

IV. Permeabilidad (permeámetro de carga constante y variable)

- IV.1 Pruebas
- IV.2.Observaciones sobre el Procedimiento
- IV.3 Cálculos

V. Consolidación

- V.1 Pruebas
- V.2.Observaciones sobre el Procedimiento
- V.3 Cálculos

VI. Prueba de compresión inconfiada para una arcilla saturada

- VI.1 Pruebas
- VI.2.Observaciones sobre el Procedimiento
- VI.3 Cálculos

VII. Prueba triaxial en un suelo granular

- VII.1 Pruebas
- VII.2.Observaciones sobre el Procedimiento
- VII.3 Cálculos

VIII. Compactación

- VIII.1 Pruebas
- VIII.2.Observaciones sobre el Procedimiento
- VIII.3 Cálculos

IX. Conclusiones

Apéndice 1

## INTRODUCCIÓN

La siguiente tesis esta dirigida a los alumnos y profesores de ingeniería civil, en su rama de Geotecnia, con la intención de brindar una herramienta de trabajo y fuente de información que facilite el aprendizaje de las prácticas y uso del equipo de laboratorio de geotecnia, de una forma sencilla y moderna para lo cual se hace uso exclusivo del Sistema Internacional de Unidades enseñando una aplicación a las ciencias de la ingeniería, para las asignaturas de comportamiento y mecánica de suelos a nivel licenciatura.

Buscando que los alumnos refuercen los conocimientos adquiridos en ciencias básicas, y los relacionen con las materias de ciencias de la ingeniería, introduciendo una visión futurista en la investigación para el cálculo, diseño y ejecución de las obras civiles.

De lo cual resulta que el contenido de este manual sea de ocho prácticas, que incluyen los ocho temas más representativos del comportamiento y la mecánica de suelos, que un alumno de ingeniería civil debe aprender como mínimo, para calcular con los resultados obtenidos en campo y procesados en el laboratorio. Los datos producto de las pruebas son necesarios para clasificar un suelo, conocer sus

propiedades físicas y mecánicas para solucionar problemas que la ingeniería civil le plantee.

El presente manual también está dirigido a los instructores de laboratorio de geotecnia que requieran comprender y enseñar de forma sencilla y práctica las pruebas que se incluyen en este manual, guiándolos paso a paso desde una breve introducción teórica hasta los cálculos necesarios para la obtención de los datos e índices que se requieren en los estudios del suelo.

Esta tesis tiene como objetivo ser un material de primera mano para la enseñanza de las ocho prácticas que lo conforman, y que se imparten en el laboratorio de mecánica de suelos a nivel licenciatura.

Finalmente, el manual incluye un apéndice con tablas que resumen las magnitudes y unidades del Sistema Internacional, así como ecuaciones útiles para la ingeniería geotécnica, con ecuaciones universales.

## Capítulo I

# Granulometría

## Introducción

Como primer punto se debe definir que el suelo es la composición de partículas de diferentes diámetros y formas. En la caracterización de un suelo, es de gran importancia determinar los rangos de estos diámetros así como las proporciones con su masa, para cada rango de los mismos. Al separar y clasificar los granos por tamaños se hace un análisis granulométrico.

Existen tres formas de realizar un análisis granulométrico: el análisis por mallas, el método del hidrómetro basado en la ecuación de Stokes, y la combinación de ambos. Para utilizar el método del hidrómetro o la combinación de ambos deberá tenerse en cuenta el suelo en cuestión, ya que estos métodos se prefieren para limos, limos arcillosos, y semejantes, es decir sí la mayor parte de la muestra pasa la malla 200.

El primero es un análisis mecánico para definir los diferentes tamaños de las partículas. Los resultados del análisis de mallas, se presentan en una tabla. Posteriormente se grafica modelando los diámetros de las partículas, en el eje de las abscisas en una escala logarítmica y el porcentaje que pasa cada malla en las ordenadas. Se obtiene así la curva granulométrica del suelo que será utilizada en la clasificación del mismo.

El segundo es uno de los métodos de vía húmeda para obtener la granulometría de la fracción fina de la muestra. En esta práctica no se plantea detallar la prueba. Es importante saber qué cantidad de la muestra se usa para la prueba de granulometría, y se aclara con el siguiente diagrama:



Fig. I.1 Tomada de la Referencia 3

## I.1 Pruebas

### I.1.a. Análisis por Mallas

- Equipo y Accesorios

Se necesita para realizar la prueba:

1. Un juego de mallas, el cual puede ser uno completo de 19 mallas, un estándar de 13 mallas o bien uno pequeño de 7 mallas el cual es suficiente, que quepa en el agitador mecánico; cualquiera con charola y tapa.
2. Un cepillo o brocha para limpiar las mallas
3. Una báscula electrónica con un mínimo 0,01 g de resolución
4. Cápsulas de 30 cm de diámetro
5. Horno de secado con termostato y funcionando entre 105 y 110°C.
6. Agitador mecánico

Malla	Diámetro [in]	Diámetro [mm]
3	3	76,2
2	2	50,8
1.5	1 ½	38,1
1	1	25,4
¾	¾	19,1
½	½	12,7
3/8	3/8	9,52
4	0,185	4,69

Tabla 1.a1

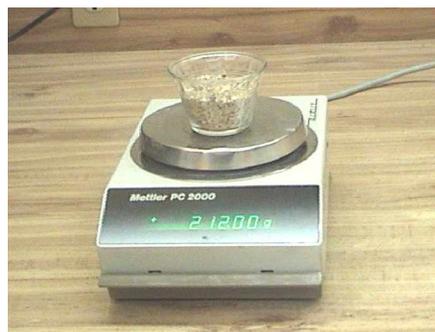
Malla	Diámetro [in]	Diámetro [mm]
8	0,0937	2,38
16	0,0469	1,19
28	0,0232	0,59
48	0,0116	0,297
100	0,0059	0,149
200	0,0029	0,074

Tabla 1.a2

- **Procedimiento**

Análisis con lavado

Previo a la realización de la práctica se toma una parte representativa de la muestra después de secar por lo menos 24 h en el horno, de ser posible se lleva al desecador de sílice, para enfriarse y se mide la masa, esta masa será la masa total de la muestra.



Después se lava en la malla 200, tratando de que se lave toda la muestra a un tiempo, durante 30 minutos bajo el chorro del agua, realizando el lavado en este momento para deshacer los grumos. Una vez lavada si es posible se seca con una pistola de aire para cabello, y se regresa al horno.



Al material que pasa por la 200, se le puede aplicar otro análisis, vía húmeda. Como ya se mencionó antes, este procedimiento no se hará en esta práctica. El material retenido se coloca en una cápsula de vidrio para regresar al horno 24 h como ya se había hecho. Para la parte que maneja el alumno, se saca del horno y se deja enfriar de la misma forma y se vuelve a medir la masa del suelo lavado y seco más la masa del recipiente.

Una vez preparada la muestra se procede al análisis granulométrico:

1. Ya calibrada y tarada la báscula de 0,01 g de resolución, se mide la masa de las mallas elegidas, de la charola usando una extensión para la báscula. Para simplificar la prueba dichas mallas, se eligen con menor diámetro de abertura, que la malla 4. y se elige un juego de mallas, que quepa en el agitador mecánico con el que se cuente, dicho juego debe tener variedad de mallas, por ejemplo, un juego que tenga las mallas 4, 8, 18, 30, 50, 80, 100, 120 y 200 es apropiado.





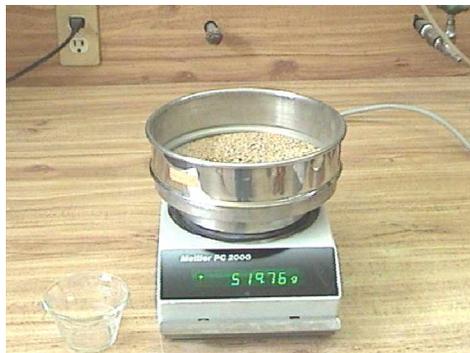
2. Para cribar se ordena el juego de mallas de la 4 a la 200 se realiza el cribado de la muestra colocando la malla cuatro en la parte superior y continuando de con las de menor diámetro de abertura, agregando la charola y la tapa como se ilustra.



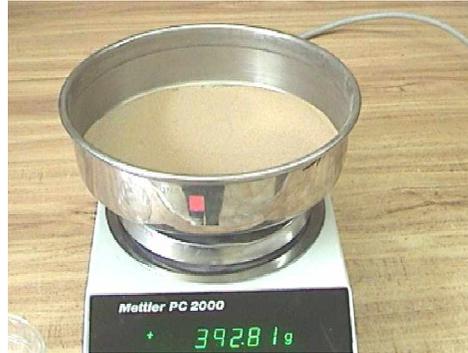
3. Para realizar el cribado es preferible utilizar un agitador mecánico, para que el movimiento sea vertical y horizontal, de manera uniforme por lo menos durante 5 minutos.



4. Se toma la malla 4 sin retirar el material retenido en la malla, se mide la masa de la misma, repitiendo la operación para cada una de las mallas haciendo un registro de las masas obtenidas.



5. El material de la charola se considera como una masa de finos que debe sumarse a los finos lavados, para obtener el total de finos.



6. Se revisa que la suma de las masas retenidas en las mallas y de los finos de la charola, sea la cantidad de masa medida al principio, aceptando solo el 0,5% de error por operación, en caso contrario es necesario repetir el cribado.
7. Una vez terminada la práctica los alumnos limpian con una brocha la muestra del material de laboratorio.



- **Observaciones sobre el Procedimiento**

Entre los puntos de cuidado, se debe tratar de no perder la masa de la muestra dejándola en los espacios libres de las mallas.

El total de la muestra al que se hace referencia es el total del cuarteo que se designa al análisis granulométrico, que ha sido secado.

El lavado de la muestra por la malla 200, debe realizarse previamente a la prueba de granulometría

Durante el cribado se recomienda que se agite siguiendo una trayectoria orbital, es decir siguiendo una elipse.

El tiempo de agitación durante el cribado sea de 5 minutos en suelos con menos del 5 % de finos, es decir aquellos que pasan la malla 200.

- **Cálculos**

1. Se capturan los datos en un formato como el 1.a.1 que se muestra en este manual, tomando como datos de la primer columna el número de las mallas utilizadas y en la segunda columna la abertura de las mismas en milímetros. En la tercera columna del formato, se anotarán las masas de cada malla con la fracción retenida en cada una de las mallas. En la cuarta columna se anota la masa de las mallas y en la quinta columna la diferencia entre la tercera y cuarta columnas que es el valor en masa del suelo retenido; todos los valores deben estar en gramos.
2. Se hace una suma de las masas retenidas en las mallas más la masa de finos lavados, más la masa de finos en la charola, para comparar con la masa total de la muestra.
3. En caso de que exista una diferencia entre la masa total de la muestra y la suma de las parciales, el error no debe ser mayor al 0,5%, si es así, se repite el proceso de la muestra y el cribado. Y si este es menor, la masa perdida se asigna a la fracción que tiene el mayor porcentaje.
4. Una vez ajustado el posible error de las masas medidas, se obtendrán los porcentajes retenidos en cada malla, estos datos se registran en la sexta

columna del formato 1.a.1 y los acumulados de los mismos que en la séptima columna del mismo. Y se calculan de la siguiente forma:

a) Todos los porcentajes retenidos para cualquier malla (i) se obtienen dividiendo la masa retenida en la malla entre la masa total de la muestra y se multiplica por cien.

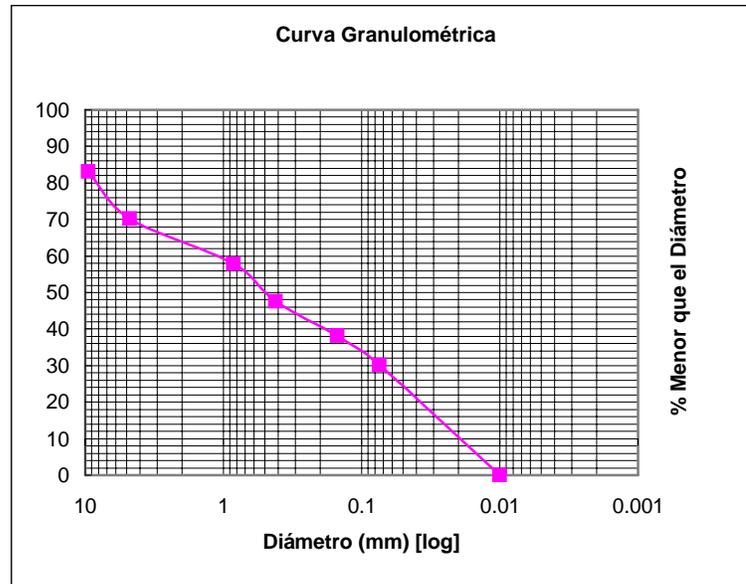
$$\% \text{ retenido}_i = \frac{\text{masa}_i \text{ retenida}}{\text{masa total}} \times 100$$

b) Para los porcentajes acumulados se toma en el primer renglón de la 7ª columna, el mismo dato del primer renglón de la sexta columna del formato 1.a.1; para el segundo renglón se suma el primer renglón de la 7ª columna más el segundo de la 6ª columna, para el tercer renglón de la 7ª columna se suma el primero, más el segundo renglón de la misma más el tercer renglón de la 6ª, y así sucesivamente.

c) La octava columna del formato 1.a.1, que es el porcentaje de finos que pasan por cada malla, se calcula de la siguiente forma: Para el primer renglón al “**100 %**” se le resta el porcentaje retenido acumulado, en dicha malla que es el primer renglón de la 7ª columna, para el segundo renglón de la 8ª columna se resta a 100 % el segundo renglón de la 7ª columna que es el retenido de la segunda malla, y así para el resto de los porcentajes.

$$\% \text{ que pasa la malla}_n = 100\% - \% \text{ acumulado}_n$$

5. Ya obtenidos los porcentajes que pasan en cada una de las mallas, se grafica en una escala semilogarítmica para los diámetros en el eje de las abscisas, y los porcentajes en el eje ordenado como se ilustra en la gráfica 1.a.1.



Gráfica 1.a.1

6. De la gráfica granulométrica obtenida se puede calcular el coeficiente de uniformidad, con la siguiente ecuación:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$D_{60}$  Diámetro por el que teóricamente pasaría el 60 % de la muestra total

$D_{10}$  Diámetro por el que pasaría el 10 % de la muestra total

7. También se puede calcular el coeficiente de curvatura como:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

Donde  $D_{30}$  es análogo a los dos anteriores.

8. Por último se hace una clasificación para la fracción gruesa de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) tomando en cuenta los porcentajes de grava, arena y finos, si es posible.



## Capítulo II

### II. Límites de Consistencia

#### Introducción

Es importante definir en primer lugar algunos conceptos como plasticidad y elasticidad, la primera es una propiedad que permite al suelo adoptar una consistencia característica, por la cual soporta deformaciones rápidas sin rebote elástico, sin cambios notables en el volumen, sin deformaciones permanentes ni agrietamientos, cada vez que se hace variar el contenido de agua, y esta propiedad guarda relación con otras propiedades como la permeabilidad, el volumen y la forma de las partículas, o bien la relación esfuerzo–deformación de los materiales que conforman el suelo.

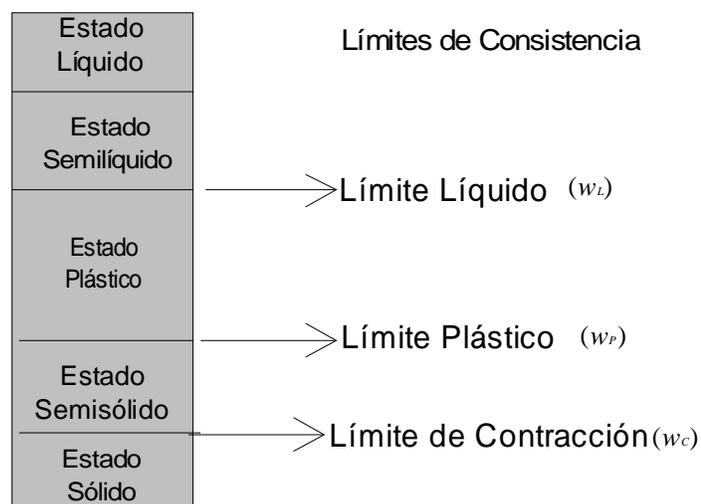
La elasticidad es una propiedad por la cual un suelo puede recuperar su forma original a pesar de un esfuerzo aplicado, sin sufrir deformaciones permanentes.

La distinción entre el comportamiento, plástico o elástico, debe ser clara, y se hace con base en dos aspectos; El historial de la relación esfuerzos deformaciones y la variación actual de los esfuerzos.

Se definen los límites de estos estados, ya que son necesarios para determinar las propiedades fisicoquímicas, y el comportamiento mecánico de las arcillas.

Los estados y límites de consistencia definidos por A. Atterberg se esquematizan a continuación:

#### Estados de Consistencia



## II. 1 Pruebas

### II.1.a. Determinación del Límite Líquido

- Equipo y Accesorios

Se necesita para realizar la prueba:

1. Copa de A. Casagrande con una solera plana de 1 cm de espesor y el ranurador plano.
2. Espátulas
3. Bolsas de plástico
4. Vidrios de Reloj
5. Horno de temperatura controlada de 105 a 110 ° C
6. Una báscula electrónica con un mínimo 0,01 g de resolución
7. Piseta

- **Procedimiento**

#### Preparación de la Muestra

Las pruebas solo se realizan con la fracción que pasa la malla 40. Una parte de esta fracción deberá secarse en el horno y se presiona con los dedos, si se desmorona con facilidad se utiliza el método de separación en seco, si tiene resistencia la preparación requerirá agua e indica que se tiene un material arcilloso.



### Límite Líquido

1. El primer paso es la verificación de la calibración de la copa de Casagrande a 1 cm de altura para la caída, con un calibrador de acero marcando el centro con la huella que se forma al golpear con la base y una esquina del calibrador, se levanta para verificar la altura deseada y se fijan los tornillos para que la altura no vuelva a variar.



2. Se toman de 40 a 50 g de la muestra de suelo saturado, y remoldeado, puesto en bolsas cerradas, para que no pierda su la humedad, 24 h antes de la realización de la prueba.



3. Se coloca en la copa, mezclándose de nuevo hasta que sea homogénea, se coloca formando una superficie plana de un centímetro de altura como máximo.



4. Se hace una ranura en el centro de la muestra colocando el ranurador perpendicularmente a la tangente de la superficie de la copa en toda la muestra.



5. Se activa el dispositivo a razón de dos golpes por cada segundo, y se cuentan el número de golpes que se necesitan para que se cierre el fondo de la ranura, a lo largo de  $\frac{1}{2}$ " o bien 1,27 cm como máximo.



6. Se vuelve a mezclar el material y a ranurar para repetir la operación, si coincide el número de golpes, con tolerancia de un golpe, se anota el valor, y si no se repite hasta que coincida el dato en dos ocasiones sucesivas.
7. Se mide la masa del vidrio de reloj sin la muestra y se registra el valor. Después se obtiene la masa de la muestra más la masa del vidrio de reloj. Dicha muestra se toma cercana a la zona de cierre en una porción de 20 a

30 g y se coloca en el vidrio de reloj. Para restarla posteriormente a la masa del vidrio de reloj.

8. Al final de la práctica se llevan los vidrios de reloj con el suelo al horno para secarlo por 24 h como mínimo. Una vez seco se vuelve a medir la masa.



9. Se repite el procedimiento con muestras de por lo menos cuatro diferentes contenidos de agua. Dos deben quedar entre 5 y 25 golpes y otros dos entre 25 y 50 golpes. Se registran en el formato 2.a.1
10. Se grafica, número de golpes contra porcentajes de contenido de agua. El límite líquido se encuentra en el valor correspondiente a 25 golpes.

### *Límite Plástico*

1. Se divide la muestra que fue preparada, la cual debe presentar una humedad aproximada a la requerida en la prueba Proctor, se toma una primer mitad, se hace un rollo de unos quince centímetros, se amaza hasta que alcance 3,2 milímetros de diámetro.



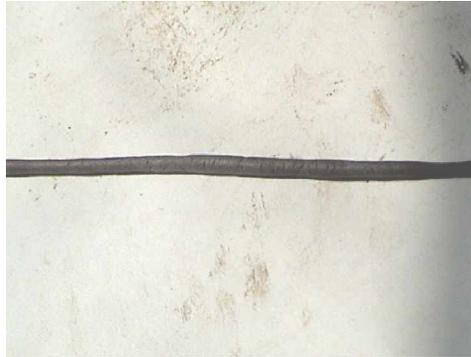
2. Si el material está muy saturado se puede trabajar sobre una hoja de papel bond para que suelte humedad, en caso de romperse el rollo se reintegra el material y se reinicia el proceso hasta lograr un diámetro de 1/8 de pulgada (3.2 mm), se puede comparar con una varilla de dicha medida, y el desmoronamiento o agrietamiento debe suceder cuando se tenga esta medida.



3. La operación se repite hasta que el rollo se sienta un poco duro, lo que indicará que ha perdido su humedad por evaporación.



4. Cuando esto sucede y llegando a los 3,2 mm, se tienen el límite plástico cuando el rollo se agriete o desmorone en este diámetro. Entonces se dobla y se coloca en un vidrio de reloj, para medir su masa y obtener su contenido de agua y se registran los datos en el formato 2.a.1



5. Se repite el procedimiento para verificar el valor obtenido, formando otro rollo como se explicó.
6. Una vez medidas y registradas las masas se colocan las muestras en el horno por 24 horas, para que pierdan su humedad, se dejan enfriar en el desecador si se cuenta con uno y se miden las masas de las muestras secas. De los valores obtenidos se verifica que las diferencias de porcentajes no sean mayores a dos, para promediar los valores, el valor promedio es el límite plástico.

#### *Contenido de Agua Natural*

1. Se mide el contenido de agua natural de una porción de la muestra, para tener un parámetro de comparación con el límite líquido y el del límite plástico.





- **Observaciones sobre el Procedimiento**

Es importante preparar la mezcla, y decidir el método de preparación de la misma.

Se seca una fracción de la muestra al horno, y se presiona con los dedos, para observar si esta se desmorona. Si es así se tiene una arena o un limo y se usa el método seco, de lo contrario se tiene una arcilla y se usa un método húmedo, que obliga a trabajar contenidos de agua de mayores a menores.

Una vez que la muestra está húmeda, se guarda en diferentes frascos con distintos grados de humedad y alguno de estos deberá aproximarse al límite plástico.

El número de golpes debe estar entre 5 y 50.

- **Cálculos**

1. Se capturan los datos en un formato como el 2.a.1 que se muestra en este manual, escribiendo en la primer y segunda columnas los datos de las pruebas y de las cápsulas.
2. Para el límite líquido se anotan en la tercer columna el número de golpes correspondientes al cierre de la copa.
3. Previó a medir la masa de las muestras se mide la masa de las cápsulas anotándolas en la séptima columna
4. En la cuarta columna se anota la masa de la cápsula con la muestra húmeda (*correspondiente al límite a calcular o el contenido de agua natural*) se lleva al horno. Una vez seca se miden las masas.
5. En la quinta columna se anotan los datos de la masa de la cápsula con la muestra seca.
6. En la sexta columna se anota la diferencia entre la cuarta y la quinta columnas que es la masa de agua.
7. Se obtiene el valor de la masa del suelo seco de restar de la quinta columna los valores de la séptima y se anota en la octava columna.
8. El contenido de agua en porcentaje se escribe en la última columna, que se obtiene de dividir la masa de agua entre la masa de sólidos y multiplicando por cien.

$$w\% = \frac{m_w}{m_s} \times 100$$

$$m_w = \text{masa de agua}$$

$$m_s = \text{masa de sólidos}$$

9. Por último se gráfica el número de golpes contra el contenido de agua. Utilizando una escala semilogarítmica. El límite líquido se encuentra donde el contenido de agua en la curva corresponda a 25 golpes.
10. El límite plástico se toma como el contenido de agua promedio de los ensayos realizados.

11. Se obtiene el Índice Plástico como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico:

$$I_p = w_L - w_P$$

12. El índice de fluidez se define como la pendiente de la curva de fluidez; numéricamente se obtiene como la diferencia de contenidos de agua en un ciclo logarítmico

13. El índice de tenacidad se obtiene a partir de la relación entre el índice de plasticidad y el de fluidez:

$$T_w = \frac{I_p}{F_w}$$

14. Se obtiene la consistencia relativa y se clasifica el fino según el criterio SUCS.

$$C_R \% = \frac{w_L - w}{I_p} \times 100$$

<b>UNAMFI</b> <b>Laboratorio de Mecánica de Suelos</b>	Procedencia _____	Fecha _____	formato 2.a1
	Localización _____		
	# Pozo _____	Profundidad _____	# Muestra _____
	# Sondeo _____	# Prueba _____	
	Profesor: _____		
	Operador _____		

<b>Límites de consistencia</b>		
<i>Propiedades índice del suelo</i>	<i>valor</i>	<i>Unidad</i>
Límite líquido	_____	[%]
Límite plástico	_____	[%]
Índice de plasticidad	_____	[%]
Índice de fluidez	_____	[%]
Índice de tenacidad	_____	
Contenido de agua natural	_____	[%]
Consistencia relativa	_____	[%]

**Límites de consistencia**  
**Límite líquido**

Prueba #	Cápsula #	Número de Golpes	Masa caps.+ suelo hum.	Masa caps.+ suelo seco	Masa de agua	Masa de cápsula	Masa del Suelo Seco	Contenido de Agua
-	-	-	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	%

**Límite plástico**

Prueba #	Cápsula #		Masa caps.+ suelo hum.	Masa caps.+ suelo seco	Masa de agua	Masa de cápsula	Masa del Suelo Seco	Contenido de Agua
-	-		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	%

**Contenido de Agua Natural**

Prueba #	Cápsula #		Masa caps.+ suelo hum.	Masa caps.+ suelo seco	Masa de agua	Masa de cápsula	Masa del Suelo Seco	Contenido de Agua
-	-		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	%

UNAMFI Laboratorio de Mecánica de Suelos	Procedencia _____	Fecha _____
	Localización _____	
	# Pozo _____	Profundidad _____
	# Sondeo _____	# Prueba _____
	Profesor: _____	
	Operador _____	

**Límites de Consistencia**  
Masas de la Muestra

Límite Líquido	_____	[%]
Límite Plástico	_____	[%]
Índice Plástico	_____	[%]
Índice de Fluidez	_____	[%]
Índice de Tenacidad	_____	[%]
Contenido de Agua inicial	_____	[%]
Consistencia Relativa	_____	[%]

**Límites de Consistencia** formato 2.a1  
**Límite Líquido**

Prueba	Número de Golpes	Masa de la Muestra Húmeda [g]	Masa de la Muestra Seca [g]	Masa de la Cápsula [g]	Masa de Agua [g]	Masa del Suelo seco [g]	Contenido de Agua %

**Límite Plástico**

Prueba	Masa de la Muestra Húmeda [g]	Masa de la Muestra Seca [g]	Masa de la Cápsula [g]	Masa de Agua [g]	Masa del Suelo seco [g]	Contenido de Agua %

## Capítulo III

### III. Densidad Relativa de los sólidos de un suelo

#### Introducción

La densidad, también llamada masa específica, es la relación que guarda la masa de la muestra con respecto al volumen de la misma. Dicha masa es la suma de aire, agua y sólidos. Se expresa de la siguiente forma.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = m_a + m_w + m_s$$

$$V = \text{Volumen total de la muestra}$$

$m_a$	Masa de aire
$m_w$	Masa de agua
$m_s$	Masa de sólidos
$V$	Volumen de la muestra

Análogamente se tienen la densidad del aire, agua y sólidos.

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} \quad \rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad \rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

En los cálculos de ingeniería es común despreciar la masa del aire en las relaciones de fase, debido a que se no se toma en cuenta para el cálculo de esfuerzos en el suelo.

Se define como agua estándar, al agua destilada, desaireada, y que se encuentra a 4°C (temperatura en la cual se presenta su máxima densidad), y sometida a 101,325 kPa de presión. El valor de su densidad, para muchos fines técnicos se considera como una constante:

$$\rho_w(\text{estándar}) = \rho_{w_0} = 1 \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3} \quad \text{ó} \quad 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

La densidad relativa es la relación que guarda la densidad de sólidos de un suelo con respecto a la densidad del agua estándar, es decir:

$$G_s = S_s = \frac{\rho_s}{\rho_0} = \frac{m_s}{V_s \rho_0}$$

Como dato interesante se sabe que la mayoría de los suelos presentan una densidad relativa dentro de los siguientes rangos:

$$\text{Arcillas} \quad 2,5 < G_s < 2,8$$

$$\text{Arenas} \quad 2,6 < G_s < 2,7$$

La densidad de una muestra saturada es la relación que guardan la masa de agua más la masa de sólidos con respecto al volumen de la muestra.

$$\rho_{sat} = \frac{m_w + m_s}{V} \quad (\text{Para } S_r = 100 \%)$$

La determinación u obtención de la densidad relativa de sólidos es necesaria para obtener el peso específico de los suelos, que a su vez ayuda a determinar su relación de vacíos y porosidad. Este dato permite determinar si un suelo es seco, parcial o totalmente saturado.

Para cualquier suelo la relación de vacíos y la porosidad guardan las siguientes relaciones con respecto a los volúmenes:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1-n}$$
$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1+e}$$

La densidad saturada se puede expresar como:

$$\rho_{sat} = \frac{(G_s + e) \rho_{\omega_0}}{1+e}$$

El peso específico de una muestra es la relación que guarda su peso con respecto a su volumen o bien su densidad por la gravedad local.

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g$$

### III. 1 Prueba

III.1.a. Determinación de la densidad relativa de los sólidos de un suelo por el método del matraz aforado.

- **Equipo y Accesorios**

Se necesita para realizar la prueba:

1. Termómetro de 0 a 50°C con una resolución de 0.1°C
2. Cápsulas de Porcelana
3. Botellas o Matraces calibrados de 500 cm<sup>3</sup>
4. Equipo de calibración
5. Una báscula electrónica con un mínimo 0,01 g de resolución
6. Piseta y Pipeta
7. Agua destilada
8. Equipo para bañomaría
9. Desecador
10. Muestra de suelo a probar

- ***Procedimiento previo***

Previo a la realización de la práctica se deben calibrar cada uno de los matraces a utilizar y se construye una curva de calibración de los mismos, ya que el volumen de agua varía con la temperatura, y por consiguiente la densidad. Se utiliza un rango de valores que para el bañomaría vayan de 35 a 20°C.

La calibración del matraz se hace de la siguiente forma:

- a) Se usa un matraz limpio de 500 cm<sup>3</sup>, y se lavan las manos con detergente para no ensuciar el matraz.



- b) Con agua destilada se llena el matraz hasta una tercera parte y se introduce el matraz en el bañomaría.
- c) Se desairea con una línea de vacío. Después se añade agua para sumar otra tercera parte, y por etapas se llega desaireando hasta muy cerca de la marca de aforo. Se deja en el bañomaría por cinco minutos.
- d) Finalmente utilizando la pipeta se llena el matraz hasta la marca de aforo. Se seca la parte interior del cuello del matraz y todo el exterior del mismo.



- e) Se mide la masa del matraz con el agua; ajustando de nuevo el menisco en la marca de aforo. Para evitar cambios bruscos el termómetro se calienta por unos segundos en el bañomaría. Se mide la temperatura en el tercio superior del bulbo del matraz. Se comienza con una temperatura cercana a los 35°C.



- f) Se deja enfriar el matraz unos  $5^{\circ}\text{C}$ , se vuelven a medir masa y temperatura. Se procede así sucesivamente, obteniendo datos para el mismo matraz, para distintas temperaturas.



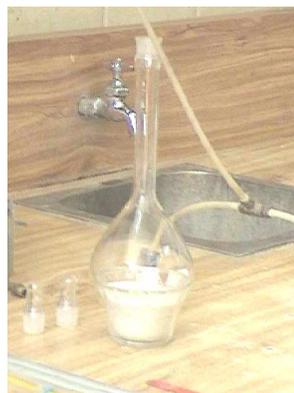
- g) Se construye una tabla de temperaturas y masas de la botella (matraz) con agua. Esta tabla se le hace llegar al alumno el día de la práctica.
- h) Con los datos que se proporcionaron (tabla de calibración) el alumno debe graficar en las ordenadas las masas de los matraces con agua y en las abscisas las temperaturas. (observándose que a mayores temperaturas la masa de agua que admite hasta la marca de aforo es menor)

- **Procedimiento**

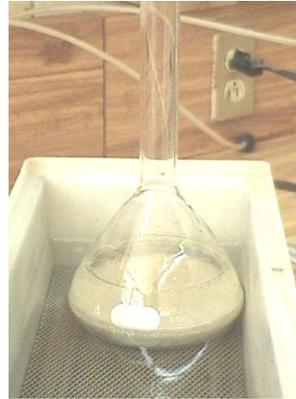
1. El día que el alumno realiza su práctica se le entrega una muestra de arena de Ottawa 20 - 30, de unos 200 g y se coloca en una cápsula de porcelana o de vidrio resistente al calor. El material previo a la practica, debe haberse secado en el horno entre  $105$  y  $110^{\circ}\text{C}$  por lo menos 24 h. Se deja enfriar en un desecador si se cuenta con él.



2. En el matraz de 500 cm<sup>3</sup> se colocan 100 cm<sup>3</sup> de agua destilada aproximadamente, y se toma la masa del conjunto, la cual debe leer con una aproximación de 0,01 g.
3. Se vacía la muestra de suelo seco en el matraz y se vuelve a medir la masa del conjunto. Se obtiene así la masa de los sólidos  $m_s$ , por la diferencia.



4. Después se pone a calentar a bañomaría para quitar el aire de la muestra, si es una arcilla se deja por lo menos media hora, y si es una arena basta con 10 minutos.



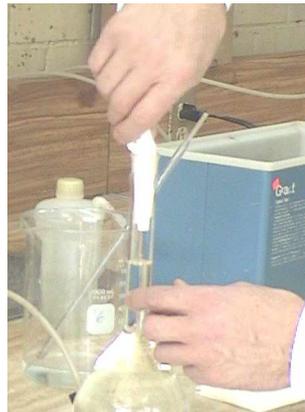
5. Se saca el matraz del bañomaría, se limpia por afuera quitando posible grasa, y se seca. Se agrega agua destilada, hasta la marca de aforo. Una vez que la temperatura sea uniforme, se toma el valor de la masa y se mide con un termómetro de 0.01°C de resolución, poniendo el termómetro en el tercio superior del bulbo del matraz, se anotan estos datos de temperatura y masa.



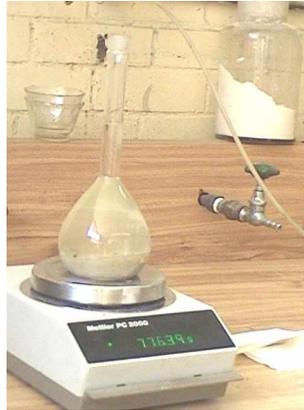
6. Se coloca el matraz sobre papel para secar y se deja enfriar; dado que el nivel del agua disminuye con la disminución de la temperatura, con la pipeta se agrega un poco de agua destilada hasta 1 mm por encima de la marca.



7. Se elimina otra vez el agua del cuello del matraz con papel, se seca el matraz por fuera. Ya aforado y seco, se mide la masa del matraz al 0,01g anotando la masa.
8. El procedimiento de medir masa y temperatura se realiza 2 veces con la condición que la diferencia sea de por lo menos 5°C.



9. De la curva de calibración, se obtiene la masa de la botella (matraz) a la temperatura del ensayo, para completar los datos del formato 3.1a



- **Observaciones sobre el Procedimiento**

Algunas veces es necesario remojar los matraces para su calibración por varias horas para evitar que guarden cualquier cantidad de grasa, dentro de las soluciones que se pueden utilizar para limpiarlos está el amoniaco, o alguna mezcla crómica.

Al llenar el matraz en la marca de aforo es importante hacer coincidir la parte inferior del menisco con la misma.

Para realizar el vaciado de la muestra seca se puede utilizar un embudo de vidrio que evita la pérdida de la misma.

- **Cálculos**

La curva de calibración construida debe asemejarse a de la fig.3.1.a

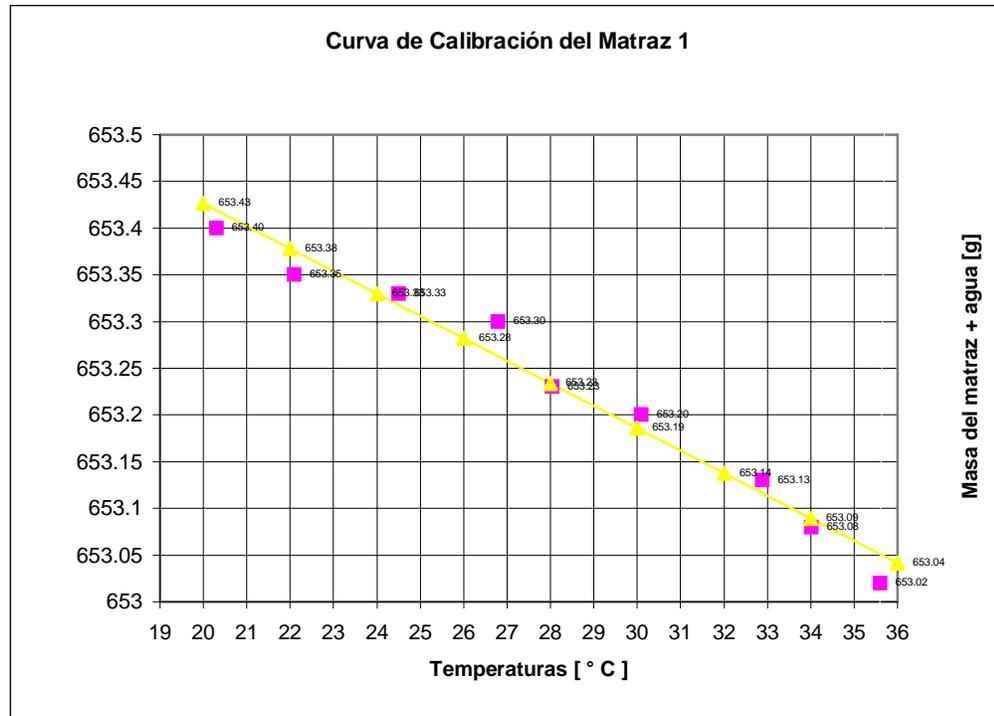


fig 3.1.a

1. Se vacían todos los datos obtenidos en los dos ensayos realizados en un formato como el 3.1 que esta al final de esta práctica.
2. Se obtiene la masa de la botella más agua de forma teórica es decir de la curva de calibración.
3. Se obtiene el volumen de sólidos como:

$$V_s = \frac{(m_{bw} + m_s - m_{bws})}{\rho_w}$$

$m_{bw}$  = masa de la botella con agua

$m_s$  = masa de sólidos secos

$m_{bws}$  = masa de la botella con agua y sólidos

$\rho_w$  = Densidad del agua a la temperatura del ensaye

4. Se obtiene el factor de corrección por temperatura del ensaye como la densidad del agua a la temperatura de ensaye entre la densidad del agua en condiciones estándar.

$$\alpha = \frac{\rho_w}{\rho_{\omega_0}}$$

5. Y por último se obtiene la densidad relativa de Sólidos como:

$$G_s = \frac{\alpha m_s}{m_{bw} + m_s - m_{bws}}$$

<b>UNAMFI</b> <b>Laboratorio de</b> <b>Mecánica de</b> <b>Suelos</b>	Procedencia _____	Fecha _____	formato 3.a.1	
	Localización _____			
	# Pozo _____	Profundidad _____	# Muestra _____	
	# Sondeo _____	# Prueba _____		
	Profesor: _____			
Operador _____				
<b>Densidad Relativa de los Sólidos del Suelo</b>				
<b>Número del recipiente</b>	<b>Unidad</b>	<b>Ensaye 1</b>	<b>Ensaye 2</b>	
Masa del recipiente + masa del suelo seco	[g]			
Masa del recipiente	[g]			
Masa de sólidos secos (m <sub>s</sub> )	[g]			
<b>Número del matraz (o botella)</b>				
Método de desaireado				
Volumen de la botella a 20 ° C	[cm <sup>3</sup> ]			
Masa de botella con agua + sólidos (m <sub>bws</sub> )	[g]			
Temperatura del ensaye (T <sub>bws</sub> )	[°C]			
Masa de la botella con agua de la curva (m <sub>bv</sub> )	[g]			
Densidad del agua a la temperatura del ensaye	[ $\frac{g}{cm^3}$ ]			
Volumen de sólidos del suelo	[cm <sup>3</sup> ]			
Densidad específica	[1]			
Factor de corrección por temperatura	[1]			
Densidad relativa de sólidos del ensaye	[1]			
<b>Densidad Relativa de los Sólidos del Suelo</b>				
<b>G<sub>s</sub> Promedio</b>		_____ [1]		

## Capítulo IV

### IV Permeabilidad

#### Permeámetros de Carga Constante y Variable

##### Introducción

Para diversas soluciones de problemas de la ingeniería, como el diseño de cortinas en presas, la falla en taludes entre otros, es de gran importancia comprender y manipular la propiedad del suelo que es la permeabilidad.

La forma de conocer esta propiedad consiste en evaluar el coeficiente de permeabilidad del suelo o bien la velocidad de filtración del agua en el mismo.

La permeabilidad está muy relacionada con la ecuación de Darcy:

$$Q = \frac{dV}{dt} = kAi$$

$Q$  = es el gasto

$A$  = área transversal

$i$  = gradiente hidráulico

$k$  = coeficiente de permeabilidad

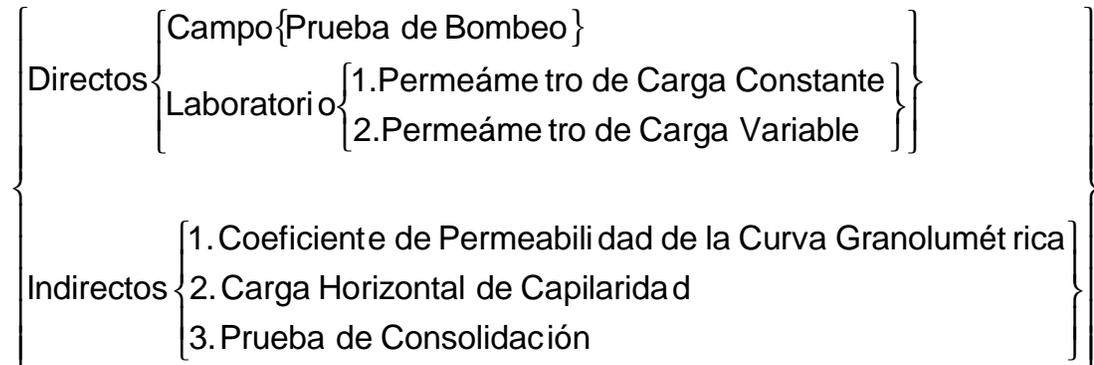
El gradiente hidráulico se define como la diferencia de nivel entre los espejos de agua (carga hidráulica) entre la longitud del suelo a estudiar.

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} = \frac{h}{L}$$

Se sabe que el agua corre de un punto de mayor presión a otro de menor. El flujo debe estar en el sentido de las presiones descendentes.

Los métodos para medir la permeabilidad se clasifican en:

## Métodos



A continuación se describen las pruebas del permeámetro de carga constante y del permeámetro de carga variable

### III. 1 Pruebas

#### III.1.a. Permeámetro de carga constante.

- **Equipo y Accesorios**

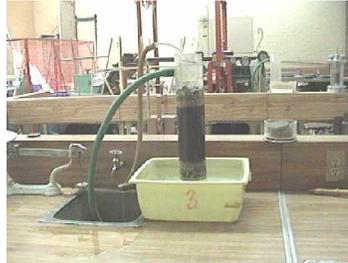
Se necesita para realizar la prueba:

1. Permeámetro de Carga Constante
2. Recipiente de vidrio de 500 mL
3. Vernier
4. Flexómetro
5. Cronómetro

- **Procedimiento**

Previo a la realización de la práctica; se carga el permeámetro que debe contener el suelo a probar, con dos filtros de arena en los extremos que

consisten en mallas y capas de suelos de mayor permeabilidad, es decir, un suelo más grueso que el suelo en cuestión y otra capa con otro suelo más grueso que el anterior (grava o arena gruesa) estas capas se colocan en ambos extremos del tubo del permeámetro. Se forma la probeta de suelo dentro del tubo con agua desaireada, todo previo a la realización de la prueba.



1. Una vez preparado el permeámetro, se coloca dentro de un recipiente con una salida. Se establece un gasto constante en el desfogue del permeámetro, es decir que haya un goteo constante, o un hilo de agua uniforme (un flujo establecido).



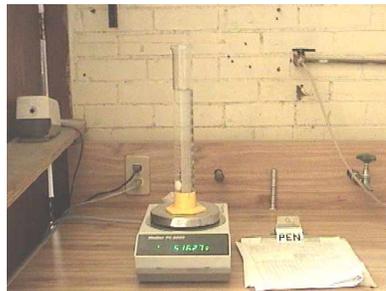
2. Una vez que el gasto es constante y sin movimiento de la carga, es decir que no se observen cambios en la parte superior, se toman las medidas de la altura del suelo contenido en el permeámetro a probar para planos perpendiculares al eje de rotación del cilindro, el diámetro interior del mismo y la distancia de espejo a espejo de agua que es la carga que debe mantenerse constante.



3. El recipiente de vidrio al cual se le mide la masa previamente, se coloca bajo la llave de desfogue, y se toma el tiempo que se tarda en llenarse al 80% de su volumen aproximadamente.



4. Se mide la masa de la probeta más el líquido desfogado, se obtiene la diferencia de masas, y se obtiene el volumen tomando en cuenta que se supone una densidad para el agua de  $\rho_{w0}=1 \text{ g/cm}^3$ .



5. Obteniendo el volumen de agua que se captó en el tiempo medido, y con el área transversal del tubo se calcula el gasto y el coeficiente de permeabilidad.

### *III.1.b. Permeámetro de Carga Variable.*

- Equipo y Accesorios

Se necesita para realizar la prueba:

1. Permeámetro de Carga Variable
2. Vernier
3. Flexómetro
4. Cronómetro

- **Procedimiento**

Previo a la realización de la práctica; se carga un permeámetro de carga variable que contenga el suelo a probar, de la misma forma que se hizo con el permeámetro de carga constante.

1. Una vez que el permeámetro está cargado se toman las medidas del espesor del suelo contenido en el permeámetro a probar en planos perpendiculares al eje de rotación del cilindro y el diámetro interior del mismo.



2. Se miden las dos marcas sobre el tubo de alimentación una en la mayor altura o carga posible y la otra en un punto cercano al comienzo del tubo del permeámetro desde el espejo de agua en el recipiente que contiene al permeámetro. Posteriormente se eleva el agua hasta llegar un poco por encima de la marca superior, manteniendo cerrado el tubo de la salida del agua.





3. Para medir el tiempo, un alumno debe colocarse al nivel de las marcas, cuando se da libre salida al agua, e iniciar el tiempo exactamente al llegar la parte inferior del menisco a la marca superior del tubo, y detener el cronómetro al llegar a la marca inferior.



4. Finalmente se mide el diámetro interior del tubo que contiene al suelo y del tubo de alimentación.





5. Se repite el experimento una vez más, tomando el valor nuevamente y se obtiene un valor promedio del tiempo de recorrido.

- **Observaciones sobre los procedimientos**

Una de las cosas más importantes, es contar con agua desaireada, el aire disuelto debe ser removido, de lo contrario puede bloquear los poros o capilares del suelo y hacer que disminuya aparentemente la permeabilidad.

El permeámetro debe contar con filtros que están compuestos por una arena o suelo más grueso que el suelo en cuestión, y un estrato de suelo a probar. Además de que se puede evitar la infiltración de aire introduciendo agua desaireada después de saturar el suelo.

Se debe comprobar que en el permeámetro la carga verdaderamente sea constante y para la prueba del permeámetro de carga variable es importante el punto de referencia que tenga la vista al tomar las lecturas, debe ser de frente y a nivel.

Otro punto importante es que el suelo en estudio esté uniformemente compactado aplicando vibración al haber introducido todo el suelo, para que la permeabilidad se considere uniforme para toda la probeta.

- **Cálculos**

*Permeámetro de carga constante*

1.a Se vacían todos los datos obtenidos en un formato como el 4.1.a que esta al final de esta práctica.

Para el permeámetro de carga constante se utiliza las siguientes fórmulas para obtener el coeficiente de permeabilidad.

2.a Se obtiene la masa del recipiente sin nada, y después del recipiente (probeta) con el agua y conocida la densidad del agua se obtiene el volumen de agua captada en éste.

3.a Con las medidas de diámetro interior se obtiene el área transversal:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} [\text{m}^2]$$

4.a Sabiendo que:

$$v = ki = k \frac{h}{L}$$

y que

$$Q = vA = kA \frac{h}{L}$$

por otro lado

$$Q = \frac{V}{t}$$

se obtiene que :

$$k = \frac{VL}{thA}$$

$L$  = Longitud del suelo

$h$  = Carga hidráulica

$A$  = Área de la sección trans.

$V$  = volumen captado en el tiempo  $t$

$t$  = Tiempo medido

*Permeámetro de carga variable*

1.b Se vacían los datos en un formato como el 4.2b

2.b Para el permeámetro de carga variable se considera que el volumen es variable y se cambia en pequeños incrementos de modo que:

$$dV = \frac{kAh}{L} dt$$

y en el tubo pequeño

$$-dV = -adh$$

entonces

$$k = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) [m/s]$$

$$h_1 = h_{1medida} - h_{c\text{máx.}}$$

$$h_2 = h_{2medida} - h_{c\text{máx.}}$$

Y

$$h_{c\text{máx}} = \frac{4T_s}{\rho g d}$$

**a** = área transversal del tubo pequeño

**A** = área transversal del tubo del Permeámetro

**L** = longitud del suelo

**t** = Tiempo medido promedio

**T<sub>s</sub>** = Tensión superficial del agua a 20°C ( $T_s = 7,3 \times 10^{-5} \text{ kN/m}$ )

**d** = diámetro del tubo de alimentación

<b>UNAMFI Laboratorio de Mecánica de Suelos</b>	Procedencia _____	Fecha _____	formato 4.1a		
	Localización _____				
	# Pozo _____	Profundidad _____	# Muestra _____		
	# Sondeo _____	# Prueba _____			
	Profesor: _____				
	Operador _____				
<b>Prueba de Permeabilidad con permeámetro de carga constante</b>					
<b>Datos del permeámetro, suelo y prueba</b>					
		<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Diámetro interior	$D_{int}$	_____	[mm]	_____	[m]
Área transversal	A	_____	[m <sup>2</sup> ]	_____	[m]
Longitud de suelo probado en dirección del flujo	L	_____	[cm]	_____	[m]
Carga Hidráulica (longitud vertical de espejo a espejo de agua)	h	_____	[cm]	_____	[m]
Masa de recipiente seco	$m_{recip}$	_____	[g]	_____	[m]
Tiempo en que se capta el volumen (masa de agua)	t	_____	[s]	_____	[m]
Masa de agua captada	m	_____	[g]	_____	[m]
Volumen de agua captada	V	_____	[m <sup>3</sup> ]	_____	[m]
<b>Coefficiente de Permeabilidad Buscado</b>	k	_____	[m/s]	_____	[m]

<b>UNAMFI Laboratorio de Mecánica de Suelos</b>	Procedencia _____	Fecha _____	formato 4.1b
	Localización _____		
	# Pozo _____	Profundidad _____	# Muestra _____
	# Sondeo _____	# Prueba _____	
	Profesor: _____		
	Operador _____		

**Prueba de permeabilidad con permeámetro de carga variable**

<i>Datos del Permeámetro, suelo y prueba</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>
Diámetro interior	$D_{int}$ _____	[mm]	_____	[m]
Área transversal	$A$ _____	[m <sup>2</sup> ]	_____	
Longitud de suelo probado en dirección del flujo	$L$ _____	[cm]	_____	[m]
Diámetro interior	$d_{int}$ _____	[mm]	_____	[m]
Área transversal del tubo de alimentación	$a$ _____	[m <sup>2</sup> ]	_____	
Carga Hidráulica (longitud vertical de la marca al espejo de agua)	$h_{1med.}$ _____	[cm]	_____	[m]
Carga Hidráulica (longitud vertical de espejo a espejo de agua)	$h_{2med}$ _____	[cm]	_____	[m]
Tiempo en que se capta el volumen (masa de agua)	$t$ _____	[s]	_____	
Altura capilar máxima en el tubo capilar	$h_{cmáx}$ _____	[m]	_____	
Volumen de agua captada	$V$ _____	[m <sup>3</sup> ]	_____	
<b>Coefficiente de Permeabilidad Buscado</b>	$k$ _____	[m/s]	_____	

## Capítulo V

### Prueba de Consolidación

#### Introducción

Para el suelo aunque las cargas aplicadas sean pequeñas la deformación que se presenta es mayor.

Dicha deformación en el suelo se debe principalmente a un cambio en el volumen, debido a la pérdida de agua.

La prueba de laboratorio basada en la teoría de Terzaghi hace las siguientes suposiciones:

- a) Se tiene un suelo homogéneo.
- b) Se trata de un suelo saturado.
- c) Existe una deformación y compresión unidimensional.
- d) Existe una constancia y certeza de las propiedades del suelo a probar.

Por lo tanto se supone una masa de sólidos sin vacíos sobre una estructura que pierde agua sin partículas de sólidos.

La prueba consiste en aplicar incrementos de carga que se aplican en toda el área de un cilindro corto confinado. Un factor de gran importancia que debe observarse es la variación en la relación de vacíos ya que ésta sucede cuando se expulsa el agua.

El principal objetivo de la prueba de consolidación es la obtención de la variación del coeficiente de consolidación  $C_v$ , que nos indica la compresión después de un incremento de presión en largo tiempo, y los datos obtenidos durante la prueba permiten graficar la curva de esfuerzos efectivos verticales contra la relación de vacíos, la cual sirve para describir el comportamiento del volumen aplicando un esfuerzo a lo largo del tiempo, es decir a partir de los datos conocidos de la probeta se obtiene la relación de vacíos inicial y final.

Para fines de esta práctica se tiene interés en el que el alumno conozca el odómetro o consolidómetro, que calcule y grafique los datos del fenómeno de compresión y compresibilidad unidimensional.

## V.1 Prueba

- **Equipo y Accesorios**

Se necesita para realizar la prueba:

1. Probeta inalterada de arcilla saturada
2. Odómetro
3. Anillo del Consolidómetro u Odómetro
4. Piedras porosas
5. Cubeta de Inmersión
6. Placa Rígida
7. Balín
8. Pesas para incrementos de carga
9. Extensómetro
10. Cronómetro
11. Báscula con resolución de 0.01 g y capacidad de 2 kg.
12. Algodón hidrófilo

- **Procedimiento**

Previo a la realización de la práctica se labra una probeta de las dimensiones del anillo del Odómetro con la probeta de suelo saturado. Se agregan en las partes superior e inferior unas placas de vidrio.

1. Se mide la masa del conjunto anillo, probeta y placas de vidrio, habiendo medido las masas de las piezas con anterioridad para poder conocer la masa de la muestra.
2. Se coloca además un anillo de algodón hidrófilo el cual debe permanecer húmedo, lo que implica rociarlo de vez en vez y que se retira hasta el incremento de carga que iguala al esfuerzo efectivo en campo.
3. Se coloca la cazuela (conjunto) sobre la plataforma del consolidómetro, se centra la piedra porosa bajo el marco de carga.
4. Después se ajusta la palanca de carga balanceando para que ésta logre la elevación exacta entre la pieza del marco de carga y la placa de la cazuela, por intermedio del balín.



5. Se coloca el extensómetro y se coloca un pesa pequeña para garantizar el contacto.



6. Listo el dispositivo se anota el valor del extensómetro antes de dar el primer incremento de carga, en el tiempo cero, y después se toman las lecturas en diferentes tiempos de 5, 15, 30, 60, 120, 240 segundos y así sucesivamente hasta que se completen las 24 horas.



7. Cuando se alcanza este tiempo entonces se da el siguiente incremento de carga y se repite el proceso de las lecturas contra tiempo.
8. Se repite el proceso cuantas veces sea posible hasta alcanzar el máximo esfuerzo programado.
9. Se retira el extensómetro para desarmar el consolidómetro, se saca el anillo, para secar la muestra en el horno y después medir la masa de sólidos de la probeta.

- **Observaciones sobre el Procedimiento**

Para realizar una prueba de consolidación se tienen presentes tres puntos importantes:

- a) La economía, ya que la prueba es muy costosa
- b) El tiempo de consolidación del suelo a probar
- c) La fricción que afecte la probeta (que no sea muy grande.)

La muestra que se utiliza en la prueba de consolidación debe ser inalterada.

Se recomienda que a cada incremento de carga dure por lo menos 24 horas.

- **Cálculos**

1. Como primer dato se obtendrá el área transversal de la probeta a partir del diámetro medido en el anillo.
2. Se calcula la altura inicial usando la altura del anillo:

$$H_i = 2H_{di}$$

3. Con los datos de laboratorio de la densidad relativa de sólidos y la masa de sólidos se obtiene la relación de vacíos inicial.
4. Ya hecha la consolidación se mide la masa de la muestra húmeda se seca en el horno se enfría y se vuelve a medir para obtener la masa de sólidos.

5. Se puede suponer el grado de saturación inicial y final como:

$$S_r = 100 \%$$

6. Conocida la masa de sólidos de la probeta se puede calcular la altura de los mismos como:

$$H_s = \frac{10m_s}{AG_s \rho_{w0}}$$

7. Se llena un formato 5.1.a con los valores de fecha y hora en la primera y segunda columna respectivamente. Después en la cuarta columna se anotan los valores obtenidos directamente de la lectura del extensómetro para cada proceso de consolidación.
8. La deformación se anota en la quinta columna del formato 5.1.a y se calcula restando a todos y cada uno de los valores el valor inicial que corresponde a la carga inicial y tiempo cero y será el pivote los valores obtenidos deben anotarse en valor absoluto.
9. Después para cada uno de los valores de carga utilizados en caso de realizarse una prueba completa, se genera una tabla de valores que contiene el esfuerzo vertical y la deformación final del extensómetro, y se anotan en el formato 1.5.b de esta práctica.
10. En la tercera columna se anotan las deformaciones totales que serán los valores del extensómetro menos el valor pivote correspondiente a la carga cero y tiempo cero anotados en valor absoluto.
11. La deformación en el equipo se considera a partir de la calibración previa. Estos valores se anotan en la cuarta columna.
12. En la quinta columna se anota la diferencia entre el valor de deformación vertical total y la del equipo para restarla a la altura inicial de la probeta.
13. Con todos los datos anteriores se puede determinar la relación de vacíos al final de cada proceso de consolidación, con la siguiente ecuación:

$$e = \frac{2H_{di} - H_s}{H_s}$$



<b>UNAMFI</b> <b>Laboratorio de Mecánica de Suelos</b>	Procedencia	_____	Fecha	_____	formato 5.1a
	Localización	_____			
	# Pozo	_____	Profundidad	_____	# Muestra
	# Sondeo	_____	# Prueba	_____	
	Profesor:	_____			
	Operador	_____			

Incremento de esfuerzo vertical aplicado  $\Delta\sigma_v =$  \_\_\_\_\_ kPa

Esfuerzo vertical final  $\sigma_{vf} =$  \_\_\_\_\_ kPa

Fecha y hora de inicio de las lecturas \_\_\_\_\_

<i>Lecturas</i>					
Fecha	Hora	Tiempo transcurrido [s]		Lectura del extensómetro	Deformación ( $\delta$ ) [mm]
		0			
		5			
		15			
		30			
		60	[1 min]		
		120	[2 min]		
		240	[4 min]		
		480	[8 min]		
		900	[15 min]		
		1 800	[30 min]		
		3 600	[1 h]		
		7 200	[2 h]		
		14 400	[4 h]		
		28 800	[8 h]		
		86 400	[24 h]		

## Capítulo VI

# Prueba de Compresión Inconfinada para una arcilla saturada

### Introducción

Para la ingeniería civil en general es importante poder caracterizar y clasificar la estructura del suelo, así como su estabilidad durante el tiempo de servicio.

Los puntos de interés son que se cuente con un correcto acoplamiento estático y dinámico, para el buen funcionamiento de la interacción suelo estructura.

Esto se logra no llegando a la falla por resistencia o por la deformación excesiva del suelo o de la estructura. Para conocer las condiciones estáticas de un suelo se utilizan las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante como son triaxiales y de corte directo.

En esta práctica se probará una arcilla saturada en compresión inconfinada es decir, incrementando la carga de forma axial únicamente, y se medirá la deformación en la dirección del eje " Z ". Y dicha prueba se denomina de compresión inconfinada.

Esta prueba es para suelos cohesivos y arcillas saturadas, ya que en suelos granulares no se puede labrar la probeta como es debido y se clasifica dentro del grupo de pruebas triaxiales aunque no lo es.

En este tipo de prueba se tiene las siguientes suposiciones:

en dirección Z

$$\sigma_c + \Delta\sigma_{af} = \sigma_{1f}$$

en dirección X e Y

$$\sigma_c = \sigma_{3f}$$

$\Delta\sigma_{af}$  = diámetro de la circunferencia de Mohr

## VI.1 Pruebas

- **Equipo y Accesorios**

Se necesita para realizar la prueba:

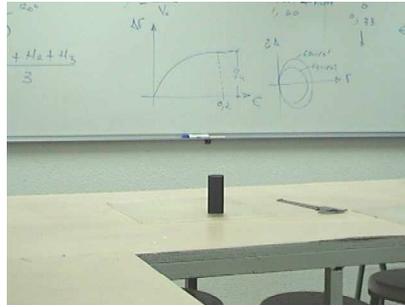
1. Torno
2. Marco de Carga
3. Báscula electrónica con 0.01 g de resolución y capacidad de 2 kg.
4. Vernier
5. Cronómetro

- **Procedimiento**

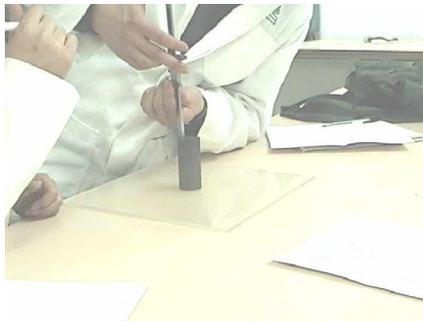
Previo a la realización de la práctica, se labra una probeta cilíndrica a partir de una muestra de tubo Shelby. Se corta en dimensión aproximada y se coloca en el torno. Con una segueta se va rebajando hasta alcanzar una medida estándar aproximadamente 9 cm de altura y 3,6 cm de diámetro.



1. Para obtener el volumen de la probeta se miden los diámetros con el vernier; uno al centro otro en la parte superior y otro en la inferior de la misma. Apenas al toque y sin lastimar la probeta. Para obtener el diámetro medio o promedio el cual se obtendrá en los cálculos más adelante.



2. En el caso de la altura ya que la cara inferior no es perfectamente perpendicular se miden tres alturas a cada  $120^\circ$  y se considera la altura como el promedio de éstas.



3. Una vez medidas las dimensiones, se calcula el volumen de la probeta, la cual durante la prueba se supone constante.
4. Se mide la masa de la probeta colocándola en la báscula tomándola cerca de su base para que solo trabaje a compresión y se obtiene la densidad del material.



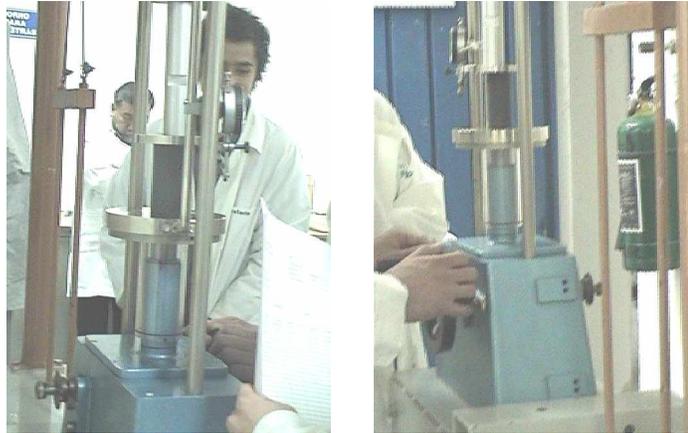
5. Después se coloca la probeta en el marco de carga, y con un movimiento de plato de base se hace contacto con el anillo de carga usando el extensómetro, haciendo un toque por instrumento es decir primero se coloca la probeta lo más cercano posible el plato superior y después se coloca el instrumento en ceros y se acerca poco a poco hasta que registre un movimiento en la aguja de la carátula.



El instructor proporciona la constante del anillo de carga para que el alumno estime la carga en función del número de unidades (rayitas) que se programen para cada incremento de carga. Se programan incrementos para llegar a la falla con por lo menos diez incrementos.



1. Se dan incrementos de cierto número de unidades. Y se hace que permanezca el valor a lo largo de un minuto antes de tomar la lectura del extensómetro (tomando el primer valor como un pivote) que actúa como el cero de las deformaciones de la probeta. Los incrementos de carga se aplican en periodos de 1 minuto hasta que falle la probeta o se detiene la prueba cuando se alcanza el 20 % de la deformación de la misma.



2. Conocidas la deformación y la altura inicial, se obtiene la deformación unitaria.



3. Se mide la masa de la cápsula de vidrio pirex, después se mide la masa de la cápsula más la masa de la probeta, se mete al horno. Una vez seca se vuelve a medir la masa, para obtener el contenido de agua antes de la prueba y después de la prueba.



- **Observaciones sobre el Procedimiento**

Es bueno que el labrado de la muestra se realice, de modo que la arcilla no pierda humedad.

Es muy importante que la carga de contacto con la probeta sea al toque para evitar deformaciones innecesarias que alterarían los resultados de la prueba.

Los incrementos de carga a escoger no deben ser muy grandes ni rápidos ya que los resultados al graficar pueden variar.

- **Cálculos**

1. Una vez medidas las dimensiones de la probeta se vacían en un formato como el VII.1 anexo a esta práctica. Siendo el diámetro inicial  $D_i$  el diámetro que se obtiene de promediar los tres diámetros medidos:

$$D_i = \frac{D_{superior} + 4D_{central} + D_{inferior}}{6}$$

La altura inicial  $H_i$  se considera como el promedio de las tres alturas medidas cada  $120^\circ$

$$H_i = \frac{H_{0^\circ} + H_{120^\circ} + H_{240^\circ}}{3}$$

Se obtiene el área transversal inicial  $A_i$  como sigue

$$A_i = \frac{\pi D_i^2}{4} [\text{m}^2]$$

Y el volumen inicial como:

$$V_i = A_i H_i [\text{cm}^3]$$

2. Y con el dato de la masa inicial medido se obtiene la densidad del material de la probeta como:

$$\rho = \frac{m}{V_i} \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

3. Para cada incremento de unidades se debe medir la carga que aplica el anillo. La carga se mide en kN que es el incremento de fuerza  $\Delta F$ .
4. Para la deformación medida en el extensómetro la cual puede contar con un valor inicial o pivote, a todos los valores leídos se les resta dicho pivote, siendo entonces la deformación que corresponde a la carga igual a cero pivote menos pivote igual a cero y para el siguiente valor es el valor leído menos el pivote, y así para todos los  $\delta_i$ .
5. Después se obtiene la deformación unitaria de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{H_i} [1]$$

$\varepsilon$  es la deformación unitaria

$\delta$  es la deformación medida en el extensómetro en [mm].

$H_i$  es la altura inicial de la probeta en [mm]

6. Con la deformación unitaria se obtiene el área corregida y se obtiene el esfuerzo desviador como sigue:

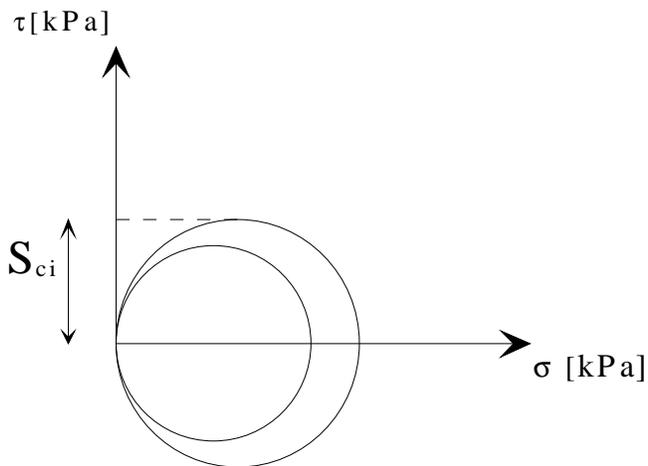
$$\Delta \sigma_a = \frac{\Delta F_z}{A_c} [\text{kPa}] \quad A_c = \frac{A_i}{1 - \varepsilon} [\text{m}^2]$$

7. Con el máximo valor de la curva  $\varepsilon - \Delta\sigma_a$  se obtiene el esfuerzo desviador de falla ( $q_u$ ) que es el diámetro de la circunferencia de Mohr. Y el radio de ésta es la resistencia de compresión inconfinada  $S_{ci}$ :

$q_u$  es el máximo valor de la curva graficada de deformación unitaria contra incremento de esfuerzo axial, de modo que la compresión inconfinada es:

$$S_{ci} = \frac{q_u}{2} [\text{kPa}]$$

### Círculo de Mohr



$$s_{ci} = \frac{q_u}{2} = \text{radio circunferencia de Mohr} [\text{kPa}]$$

Para obtener las circunferencias de las dos pruebas, los equipos se proporcionarán los datos obtenidos para comparar las circunferencias.



## Capítulo VII

### Prueba Triaxial en un Suelo Granular

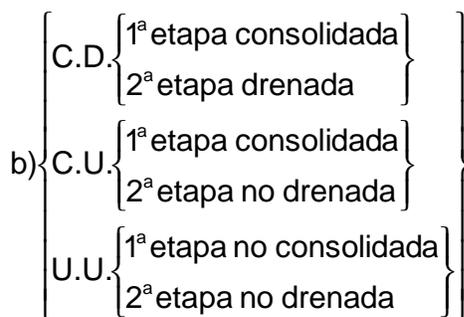
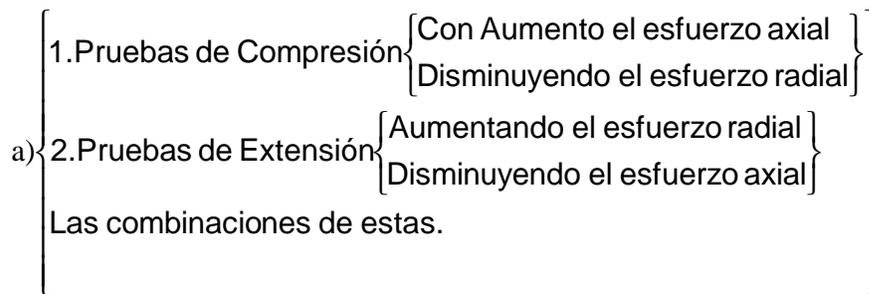
#### Introducción

Las cámaras triaxiales cuentan con un vástago, una camisa, un sistema de drenaje para de control de la presión y un instrumento de medición para evaluar la deformación vertical.

Se forma una probeta utilizando la presión negativa de un líquido y una membrana impermeable, como por ejemplo látex; a continuación, se sostiene el molde hasta que la presión del agua pueda dar un equivalente de confinamiento a la probeta.

De acuerdo con los tipos de pruebas triaxiales, se clasifican con respecto a:

- a) Los esfuerzos que se aplican en la segunda etapa
- b) Con respecto a las condiciones de drenaje que se presentan.



Para esta práctica se aplica la prueba triaxial a una probeta de arena. En este tipo de prueba se puede conocer bien todo el estado de esfuerzos y la cámara triaxial se puede adaptar a otro tipo de especificaciones.

Entre otras ventajas que tiene este tipo de prueba, es que es más rápida y sencilla. Además, cuenta con drenajes que facilitan el manejo de la probeta en condición de saturación.

Se tiene mayor uniformidad en la distribución de esfuerzos, y el cambio de volumen se conoce de un modo más exacto, debido a que puede conocer el volumen de agua desalojado.

Para una prueba triaxial CD se tienen las siguientes condiciones en la falla;

en dirección del eje Z :

$$\sigma_c + \Delta\sigma_{af} = \sigma_{1f}$$

$$y \quad \Delta u = 0 + \Delta u_{1f} = 0; \Rightarrow \Delta u_f = 0$$

en dirección de X e Y :

$$\sigma_c = \sigma_{3f}$$

en esfuerzos efectivos en Z :

$$\sigma'_{1f} = \sigma_{1f} - \Delta u_f = \sigma_c + \Delta\sigma_{af}$$

$$\sigma'_{1f} = \sigma_{1f} = \sigma_c + \Delta\sigma_{af}$$

en XY :

$$\sigma'_{3f} = \sigma_{3f} - \Delta u_f = \sigma_c - \Delta u_f$$

$$\sigma'_{3f} = \sigma_{3f} = \sigma_c$$

$\Delta\sigma_{af}$  = Incremento de esfuerzo axial de falla

## VII.1 Prueba

- **Equipo y Accesorios**

Se necesita para realizar la prueba:

1. Marco de carga
2. Anillo de Carga
3. Cámara Triaxial
4. Báscula con exactitud de 0,01 g
5. Equipo para desairear (baño maría y bomba de vacío)
6. Pipeta

7. Aire con conexión a presión
8. Manómetro
9. Molde para formar probetas
10. Equipo para saturar las líneas de la cámara
11. Membrana impermeable de látex
12. Ligas y expansor para las mismas
13. Vaso de policarbonato en el marco de carga

- **Procedimiento**

1. Lo primero que se hace es sacar el aire de los drenes de la base de la cámara triaxial con un flujo de agua intenso, con el fin de saturar las líneas.



2. Una vez saturados los drenes, se coloca una piedra porosa para permitir el drenaje, pero que la arena no descienda por el mismo.



3. Después se coloca una membrana elástica de látex para contar con una frontera impermeable.



4. Se fija con una liga briada a la base de la cámara, utilizando un expansor de lucita. Se le hacen cuatro dobleces, y se coloca en la base de la cámara. Por último se pone otra liga casi a la altura de la piedra porosa para asegurar que la arena no baje más allá de esta.



5. Se coloca el molde metálico con una liga doble y un forro de papel en la pared interna, se coloca sobre la base y se pasa la membrana a través del molde, se conecta el vacío al molde para que la membrana se pegue a las paredes de éste.





6. El molde se llena con agua para que no quede atrapado aire en la estructura sólida del suelo (arena) Se le coloca una extensión al molde.



7. Se prepara una cantidad definida de masa de arena en agua desaireada dentro de un matraz. Esta agua permite una lluvia de arena en agua para lograr un estado suelto y depositarla en el molde interior de la cámara triaxial.



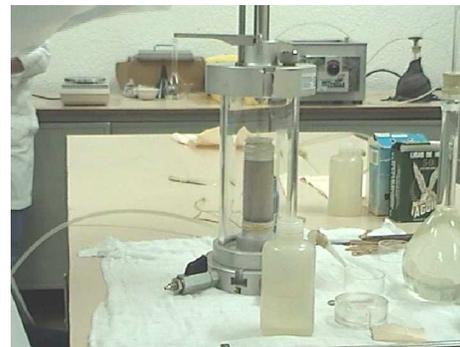
8. Una vez vaciada la arena se quita la extensión, se dobla la membrana, se coloca la cabeza ciega y tapada, y se sube la membrana. Se coloca otra liga de cierre la cabeza ciega.



9. Se corta la liga del molde, se baja la bureta conectada al drenaje para generar vacío y se desconecta la línea de vacío conectada al molde. Se quita la liga para retirar el molde de dos mitades dejando la membrana a la vista, la probeta se sostiene con la presión negativa del agua.

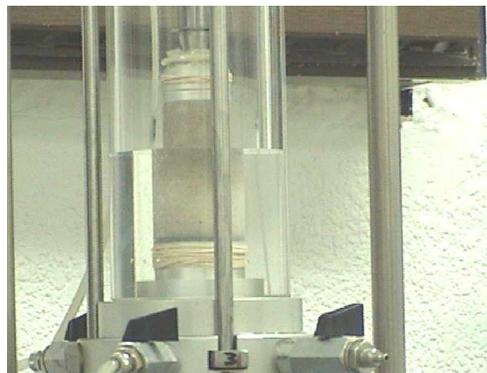
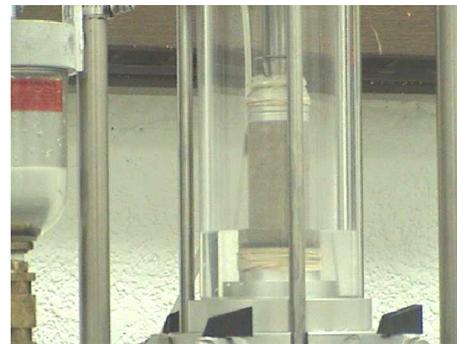


10. Cuando la probeta esta formada se coloca la camisa de la cámara triaxial, se sube el vástago del marco de carga para no golpear la probeta, una vez en su lugar se gira para centrarlo bien.

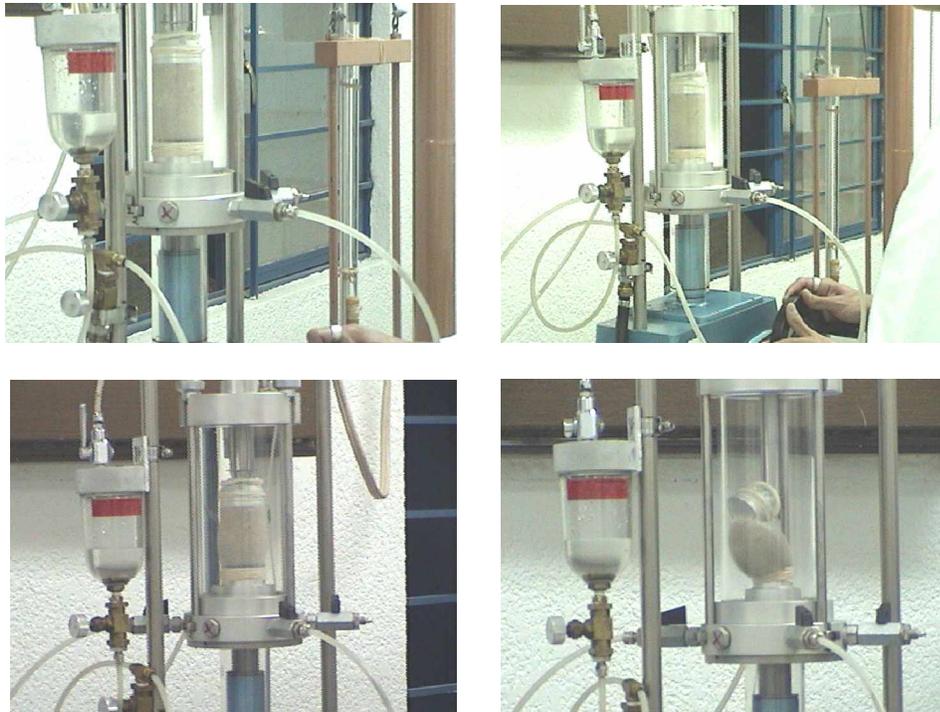




11. Se sube el agua para aplicar finalmente presión con un valor aproximado de 50 kPa.



12. Una vez llena la cámara, se dan incrementos de carga vertical hasta que se presente la falla en intervalos de 1 minuto aumentando tres unidades en tres unidades en cada intervalo en el extensómetro del anillo de carga, hasta la falla.



- **Observaciones sobre el Procedimiento**

El objetivo de la práctica es calcular la resistencia de un suelo granular realizando una prueba triaxial de incremento de carga controlada. Por lo que se recomienda usar una arena con partículas redondeadas.(arena de Ottawa 20-30)

La presión de confinamiento a la probeta debe mantenerse siempre constante. Para esto se observa y controla el manómetro diferencial en todo momento para evitar cambios bruscos en la presión.

El diámetro del molde de la probeta debe ser preferentemente de 2½" ó aproximadamente 3,6 cm de diámetro y 8 cm de altura.

Se debe garantizar una saturación del 80 al 100 %

- **Cálculos**

1. Se vacían los datos en un formato como el VII.1 siendo  $D_r$  % la compacidad relativa del suelo.

$$D_r \% = \frac{\frac{1}{\rho_{d \text{ mín}}} - \frac{1}{\rho_{d \text{ nat}}}}{\frac{1}{\rho_{d \text{ mín}}} - \frac{1}{\rho_{d \text{ max}}}} \times 100$$

2. Para cada incremento de carga se debe medir la carga en el anillo, la carga en kN que es el incremento de fuerza  $\Delta F$ .
3. Para la deformación medida en el extensómetro la cual puede contar con un valor inicial o pivote, a todos los valores leídos se les resta dicho pivote, siendo entonces la deformación que corresponde a la carga igual a cero pivote menos pivote igual a cero y para el siguiente valor es el valor leído menos el pivote, y así para todos los  $\delta_i$ .
4. Después se obtiene la deformación unitaria de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{H_i} [1]$$

$\varepsilon$  es la deformación unitaria

$\delta$  es la deformación medida en el extensómetro.

$H_i$  es la altura inicial medida a la probeta

5. Con la deformación unitaria se obtiene el área corregida y se obtiene el esfuerzo desviador como sigue:

$$A_c = \frac{A_i}{1 - \varepsilon} [\text{m}^2] \qquad \Delta\sigma_\alpha = \frac{\Delta F}{A_c} [\text{kPa}]$$

6. Se obtiene el área corregida como:

$$A_c = \frac{A_i}{1 - \varepsilon}$$

7. Considerando un volumen constante se tiene que la densidad seca es la masa de sólidos entre el volumen.

$$\rho_d = \frac{m_s}{V}$$

8. Las densidades secas máxima y mínima, el diámetro inicial, la altura inicial, y el esfuerzo  $\sigma_c$ , se deben proporcionar por el instructor del laboratorio.

9. El ángulo de fricción interna en términos de esfuerzos efectivos se calcula de la siguiente forma:

$$\phi' = \text{ang} \operatorname{sen} \frac{\sigma_{1f}' - \sigma_{3f}'}{\sigma_{1f}' + \sigma_{3f}'}$$

Sabiendo que  $\sigma_c = \sigma_{3f}'$  y que  $\sigma_{1f}' = \sigma_c + \Delta\sigma_{af}$



## Capítulo VIII

### Compactación

#### Introducción

Dentro de las aplicaciones de la geotecnia y la mecánica de suelos en las obras civiles, están el mejoramiento de suelos para evitar la ruptura en la estructura del suelo, así como las grandes deformaciones que se pueden presentar en las obras civiles que se construyen en dichos suelos.

Entre estas obras las que más consideran las pruebas de compactación, como la prueba Proctor, es el trazo y nivelación de carreteras, ya que en muchos casos para lograr mayor resistencia en el suelo es indispensable utilizar un método de mejoramiento.

La relación que un suelo guarda entre su contenido de agua y compactación y su capacidad de carga es muy importante para determinar a que grado un suelo debe humedecerse y compactarse, para que alcance una buena capacidad de carga.

Un suelo compactado es un suelo parcialmente saturado para el cual se hacen las siguientes consideraciones:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad y \quad w = \frac{m_w}{m_s}$$

y

$$\rho_d = \frac{m_s}{V}$$

con  $V = \text{cte. en ambos}$

$$V = \frac{m_w + m_s}{\rho} = \frac{m_s}{\rho_d} \Rightarrow \rho_d = \rho \frac{m_s}{m_w + m_s}$$

entonces

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{\frac{m_w + m_s}{m_s}}$$

finalmente

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}$$

La prueba más sencilla y utilizada es la Prueba Proctor Estándar que considera en su cálculo una ecuación de energía específica de compactación del martillo:

$$E_c = \frac{Nnm_{mo}gh}{V}$$

donde:

$E_c$  = energía específica de compactación

$N$  = número de capas

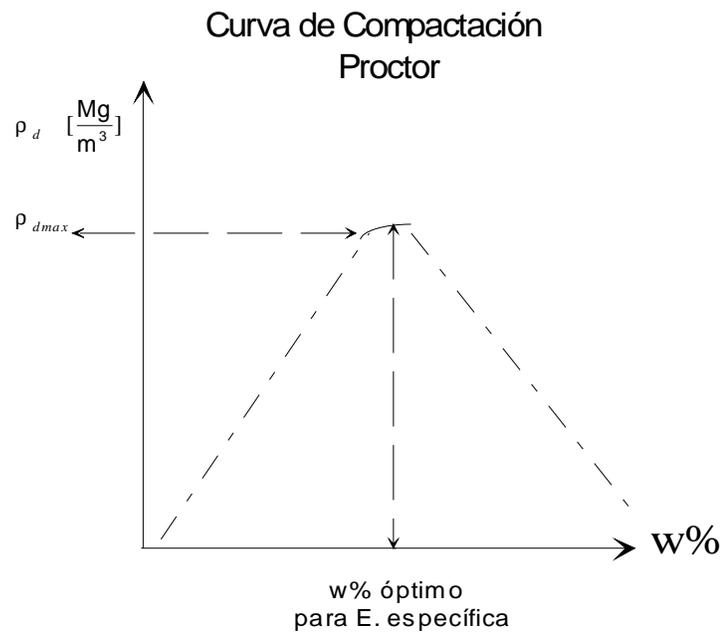
$n$  = número de golpes

$V$  = volumen del molde

Y se toman los valores de:

$$\begin{aligned} g &= 9,807 \text{ m/s}^2 \\ m_{mo} &= 2,495 \text{ kg} \\ n &= 25 \text{ golpes /capa} \\ N &= 3 \text{ capas} \\ h &= 0,3048 \text{ m} \\ V &= 0,944 \text{ dm}^3 \\ E_c &= 593 \text{ kJ/m}^3 \end{aligned}$$

Por lo que graficando el contenido de agua contra la densidad seca se tiene una grafica como la que a continuación se ilustra para suelos mixtos.



Y la compactación relativa del suelo es:

$$C_R \% = \frac{\rho_d(\text{campo})}{\rho_d(\text{máx.laboratorio})} \times 100$$

## VI.1 Pruebas

- **Equipo y Accesorios**

Se necesita para realizar la prueba:

1. Molde para prueba Proctor Estándar
2. Equipo de martillo para Prueba Proctor Estándar
3. Copete para molde
4. Báscula electrónica con 0,1 g de resolución
5. Bascula electrónica con capacidad de 2 kg y 0,01 g de resolución
6. 3 a 5 kg. de muestra de un suelo
7. Brocha

- **Procedimiento**

1. Se mide la masa del molde de la prueba con todo y mariposas, y el copete o extensión.



2. Una vez medida la masa se retira el copete para llevar el molde a la balanza y conocida la masa del molde más una capa se iguala en la báscula el valor, bajando la muestra desde el empaque o bolsa.



3. Cuando se alcanza dicha masa se baja el molde al suelo y entre dos personas se le aplican 25 golpes. Una persona con las dos manos coloca el tubo guía y otra sube el martillo a tope para dejarlo caer. La primera persona alinea el tubo con el nivel superior del suelo.



4. Se distribuyen los golpes alrededor del área transversal del molde algunos al centro y otros alrededor subiendo siempre al tope sin importar que quede masa de suelo pegada en el martillo.



5. Después se lleva el molde a la báscula otra vez, para igualar la masa al valor de la masa del molde y dos capas, y se aplican otros 25 golpes.

6. Cuando se dio esta serie de golpes se coloca el copete asegurándolo con las mariposas y se lleva a la báscula para igualar la masa de la masa del molde más el copete más tres capas. Se baja el molde al suelo y se repite la operación de los 25 golpes.



7. Ya terminados los golpes se retira el copete, aflojando las mariposas y dando pequeños golpecitos al copete para girarlo sin romper el suelo y se levanta en forma vertical con mucho cuidado.



8. Al levantar el copete el suelo compactado puede quedar 1 cm por encima del borde superior del molde si no es así se repite la prueba. Pero si está en rango, se recorta el material excedente con una regleta afilada dejando caer el material sobrante y se limpia.



9. Ya enrasado se mide la masa del molde más el suelo compactado.



10. Se excava en el centro del molde y se toma una pequeña muestra del suelo compactado y se deposita en un recipiente del cual se conoce la masa, y después se mide la masa del recipiente más el suelo húmedo.



11. Ya medida la masa de la muestra se lleva al horno durante 24 horas o más . Si es posible se enfría en un desecador y se vuelve a medir la masa del recipiente más la masa del suelo seco.

- **Observaciones sobre el Procedimiento**

El golpeteo del martillo debe ser siempre con el molde en el suelo para dar la energía exacta calculada.

Es importante no dejar de medir la masa del copete con todo y las mariposas, para que no haya diferencias grandes en los cálculos.

Al retirar el copete es importante dar pequeños golpes para que gire por si solo antes de levantarlo y no cortar el suelo compactado.

En caso de que el suelo quede más de un centímetro sobre el molde debe repetirse la prueba, Se debe cuidar también que no quede muy por debajo del borde del molde.

Al igualar la masa de la báscula con la propuesta en la calibración se puede tener una tolerancia de hasta 1 gramo.

- **Cálculos**

Se mide la masa del recipiente más la masa del suelo seco se obtiene la masa del suelo seco. Una vez definida la masa de suelo seco se hace la diferencia entre la masa de suelo húmedo y seco y se obtiene la masa de agua.

$$m_{sh} - m_{s.seco} - m_{recipiente} = m_w$$

para poder calcular la densidad seca se aplica la siguiente ecuación:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}$$

$$w = \frac{m_w}{m_s}$$

<p><b>UNAMFI</b></p> <p><b>Laboratorio de Mecánica de Suelos</b></p>	<p>Procedencia _____ Fecha _____ formato 8.1a</p> <p>Localización _____</p> <p># Pozo _____ Profundidad _____ # Muestra _____</p> <p># Sondeo _____ # Prueba _____</p> <p>Profesor: _____</p> <p>Operador _____</p>
--	---

### Prueba de Compactación Proctor Estándar

Equipos	1	2	3	4
Datos	Cantidades			
Unidad				
Masa del molde + suelo húmedo	[kg]			
Masa del molde	[kg]			
Masa del suelo húmedo	[kg]			
Densidad del suelo húmedo ( $\rho$ )	$[\frac{kg}{dm^3}]$			
Número de recipiente				
Masa del recipiente + suelo húmedo	[g]			
Masa del recipiente + suelo seco	[g]			
Masa del agua ( $m_w$ )	[g]			
Masa del recipiente	[g]			
Masa del suelo seco ( $m_s$ )	[g]			
Contenido de Agua	[1]			
Densidad del suelo seco ( $\rho_d$ )	$[\frac{Mg}{m^3}]$			

## CONCLUSIONES

De la presente tesis se puede concluir, que el resultado del trabajo realizado es un manual moderno, sencillo y comprensible para el laboratorio de mecánica de suelos, cuyo contenido encierra los conocimientos requeridos en el nivel licenciatura, que además de ser un material de apoyo, puede ser de uso cotidiano en la realización de las prácticas de geotecnia. Y una herramienta de aprendizaje para los alumnos o de enseñanza para los profesores e instructores de laboratorio.

La elaboración de este manual, no solo alcanzó sus expectativas, ya que fomenta el hábito de la investigación, con un profundo aprendizaje y comprensión de las prácticas aquí contenidas.

Durante el desarrollo de este manual, quién presenta la tesis incrementó el conocimiento de los temas que en él se imparten, brindándole la oportunidad de aprender a redactar memorias de cálculo y los procedimientos que en cada práctica se requieren. Así también, ganó práctica en la elaboración de material docente, que es un tipo de actividad que generalmente no se practica a lo largo de la carrera.

Adicional a lo anterior, la serie de conocimientos aquí contenidos son parte importante del desarrollo profesional, ya que la aplicación de los mismos

resuelve problemas de geotecnia en campo y/o sirve como capacitación para otros ingenieros.

Otra aplicación es que se utilice para ejercer la docencia, sirviendo como primer experiencia al autor para elaborar material didáctico e impartir los conocimientos de ingeniería civil, con una visión más moderna y accesible.

Por último este manual integra los conocimientos adquiridos durante la carrera buscando aprovecharlos y ligarlos entre sí, con el fin de analizar diversos procesos para aplicarlos a la ingeniería civil.

<b>TABLA DE LA CLASIFICACIÓN PARA LAS MAGNITUDES FUNDAMENTALES Y DERIVADAS</b>				
<b>TIPO Y NOMBRE DE MAGNITUD</b>	<b>ECUACIÓN DE FÍSICA</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>DIMENSIÓN</b>
<b>FUNDAMENTALES</b>				
LONGITUD		metro	m	L
MASA		kilogramo	kg	M
TIEMPO		segundo	S	T
INTENSIDAD DE CORRIENTE		ampere	A	I
TEMPERATURA		kelvin	K	t
INTENSIDAD LUMINOSA		candela	cd	I
<b>GEOMÉTRICAS</b>				
LONGITUD	VARIAS	metro	m	L
ÁREA O SUPERFICIE	VARIAS	metro cuadrado	m <sup>2</sup>	L <sup>2</sup>
VOLUMEN	VARIAS	metro cúbico	m <sup>3</sup>	L <sup>3</sup>
MOMENTO DE SUPERFICIE	VARIAS	metro a la cuarta potencia	m <sup>4</sup>	L <sup>4</sup>
MOMENTO DE VOLUMEN	VARIAS	metro a la quinta potencia	m <sup>5</sup>	L <sup>5</sup>
ÁNGULO PLANO	VARIAS	radián	rd	1
ÁNGULO SÓLIDO	VARIAS	estereoradián	sr	1
VERGENCIA DE LOS SISTEMAS ÓPTICOS		dioptría	δ	-
TÍTULO ALCOHOMÉTRICO	VARIAS	grado alcométrico	GL	-

VERGENCIA DE LOS SISTEMAS ÓPTICOS		dioptría	$\delta$	-
TÍTULO ALCOHOMÉTRICO	VARIAS	grado alcométrico	GL	-
<b>ESTÁTICAS</b>				
ACELERACIÓN	$a = \frac{V}{t}$	metro sobre segundo cuadrado	$\frac{m}{s^2}$	$LT^{-2}$
FUERZA	$F = m a$	newton	N	$LMT^{-2}$
PESO	$w = m g$	newton	N	$LMT^{-2}$
MASA VOLUMÍNICA (DENSIDAD)	$\rho = \frac{m}{V}$	kilogramo por metro cúbico	$\frac{kg}{m^3}$	$L^3M^{-1}$
VOLUMEN MÁSSICO	$\sigma = \frac{V}{m}$	metro cúbico sobre kilogramo	$\frac{m^3}{kg}$	$L^{-3}M$
PESO ESPECÍFICO	$\gamma = \rho g$	kilogramo sobre metro cuadrado por segundo cuadrado	$\frac{kg}{m^2s^2}$	$MM^{-2}S^{-2}$
LEY DE HOOKE	$F = k\Delta x$	newton	N	$LMT^{-2}$
MOMENTO DE FUERZA O PAR	$C = \frac{P}{\omega}$	metro-newton o juole sobre radián	$mN$ ó $\frac{J}{rd}$	$L^2MT^{-2}$
MOMENTO DE INERCIA	$I = \int r^2 dm$	kilogramo metro cuadrado	$Kg m^2$	$L^2M$
PRESIÓN ESTÁTICA RESTRINGIDA	$P = \frac{F}{A}$	pascal	Pa	$L^{-1}MT^{-2}$
<b>CINEMÁTICAS</b>				
VELOCIDAD LINEAL	$v = \frac{dl}{dt}$	metro sobre segundo	$\frac{m}{s}$	$LT^{-1}$
VELOCIDAD ANGULAR	$\omega = \frac{d\vartheta}{dt}$	radián sobre segundo	$\frac{rd}{s}$	$\frac{1}{s}$
ACELERACIÓN LINEAL	$a = \frac{dv}{dt}$	metro sobre segundo al cuadrado	$\frac{m}{s^2}$	$LT^{-2}$
ACELERACIÓN ANGULAR	$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$	radián sobre segundo cuadrado	$\frac{rd}{s^2}$	$\frac{1}{s^2}$
FRECUENCIA	$f = \frac{1}{T}; T = \text{periodo}$	hertz	Hz	$\frac{1}{s}$
PULSACIÓN	$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$	radián sobre segundo	$\frac{rd}{s}$	$\frac{1}{s}$
LONGITUD DE ONDA	$\lambda = \frac{c}{f}$	metro	m	L

<b>RELACIONES DE FASE</b>		
<b>CONCEPTO</b>	<b>ECUACIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>
RELACIÓN DE VACÍOS	$e = \frac{V_v}{V_s}$	[ 1 ]
DENSIDAD	$\rho = \frac{m}{V}$	$\frac{\text{Mg}}{\text{m}^3}$
POROSIDAD	$n \% = \frac{V_v}{V_m} \times 100$	%
CONTENIDO DE AGUA	$w \% = \frac{m_w}{m_s} \times 100$	%
GRADO DE SATURACIÓN	$S_r \% = \frac{V_w}{V_v} \times 100$	%
PESO	$W = mg$	kN
DENSIDAD RELATIVA DE LOS SÓLIDOS	$G_s = S_s = \frac{\rho_s}{\rho_{\omega o}} = \frac{m_s}{V_s \rho_{\omega o}}$	[ 1 ]
DENSIDAD SATURADA	$\rho_s = \frac{m_w + m_s}{V_v} (\rho_r = 1)$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
PESO ESPECÍFICO	$\gamma = \rho g = \frac{mg}{V}$	$\frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
PRESIÓN HIDROSTÁTICA	$p = \rho \gamma z$	kPa

<b>CONVERSIÓN DE UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL A UNIDADES TÉCNICAS MÉTRICAS UTILIZADAS EN INGENIERÍA CIVIL</b>		
<b>Unidad del Sistema Internacional</b>	<b>Unidad técnica métrica</b>	<b>Factor de conversión</b>
Masa		
kilogramo ( kg )	utm	$1,019\ 72 \times 10^{-1}$
Fuerza o Peso		
newton ( N )	gf	$1,019\ 72 \times 10^2$
	kgf	$1,019\ 72 \times 10^{-1}$
	tf	$1,019\ 72 \times 10^{-4}$
Esfuerzo o Presión		
pascal ( Pa )	gf/cm <sup>2</sup>	$1,019\ 72 \times 10^4$
	kgf.m	$1,019\ 72 \times 10^{-1}$
	tf.m	$1,019\ 72 \times 10^{-4}$
Energía o trabajo		
joule ( J )	gf.cm	$1,019\ 72 \times 10^4$
	kgf.m	$1,019\ 72 \times 10^{-1}$
	tf.m	$1,019\ 72 \times 10^{-4}$
Peso específico		
newton por cada metro cúbico ( N/m <sup>3</sup> )	gf/cm <sup>3</sup>	$1,019\ 72 \times 10^{-4}$
	kgf/dm <sup>3</sup>	$1,019\ 72 \times 10^{-4}$
	tf/m <sup>3</sup>	$1,019\ 72 \times 10^{-4}$

<b>CONVERSIÓN DE UNIDADES DE UNIDADES TÉCNICAS MÉTRICAS SISTEMA INTERNACIONAL UTILIZADAS EN INGENIERÍA CIVIL</b>		
<b>Unidad técnica métrica</b>	<b>Unidad del Sistema Internacional</b>	<b>Factor de conversión</b>
Masa		
utm	kilogramo ( kg )	9,806 65
Fuerza o Peso		
gf	newton ( N )	$9,806\ 65 \times 10^{-3}$
kgf		9,806 65
tf		$9,806\ 65 \times 10^3$
Esfuerzo o Presión		
gf/cm <sup>2</sup>	pascal ( Pa )	$9,806\ 65 \times 10^1$
kgf·m		$9,806\ 65 \times 10^4$
tf·m		$9,806\ 65 \times 10^3$
Energía o trabajo		
gf·cm	joule ( J )	$9,806\ 65 \times 10^{-5}$
kgf·m		9,806 65
tf·m		$9,806\ 65 \times 10^3$
Peso específico		
gf/cm <sup>3</sup>	newton por cada metro cúbico ( N/m <sup>3</sup> )	$9,806\ 65 \times 10^3$
kgf/dm <sup>3</sup>		$9,806\ 65 \times 10^3$
tf/m <sup>3</sup>		$9,806\ 65 \times 10^3$

## Bibliografía

1. K. H. Head  
Manual of Soil laboratory Testing vol 1  
Ed Peritech Press  
Clave TA7110H42  
ED. 1992  
pp. 117-130, 187-191,
2. T. W. Lambe  
Soil Testing for Engineers  
Ed. J. W.  
pp. 15-19, 22-25, 29-33,43-47,  
52-56, 74-82,110-111,
3. IMTA  
Mecánica de Suelos  
Instructivo para el ensaye de suelos  
CFE 1990  
pp. 47, 69-89, 132-148, 154-170, 206-240.
4. Juárez Badillo, r. Rodríguez  
Mecánica de Suelos  
Tomo 1 "Fundamentos de la mecánica de suelos"  
Pp 97-121,144-146. 219-228,  
247-253, 376-379, 576-580
5. Frank J. Blatt  
Fundamentos de Física  
Ed. Prentice Hall  
Tercera Edición 1991  
pp. 1-8
6. Paul G. Hewitt  
Física Conceptual  
Editorial Addison Wesley Longman  
Tercera Edición 1999  
pp. 647 al 650
7. Raymond Allard  
Ingeniería de Investigaciones  
Sistema Internacional de Medidas  
Ed. Limusa  
México 1979  
pp. 12-20