



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

*FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ACATLÁN*

***“MANUAL DE ENSAYES DE LABORATORIO
DE MECÁNICA DE SUELOS”***

T E S I S

*QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL*

P R E S E N T A

JUAN CÉSAR GUTIÉRREZ ÁVILA

ASESOR: DR. RICARDO ENRIQUE ORTÍZ HERMOSILLO

SEPTIEMBRE 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



MANUAL DE ENSAYES DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

RESUMEN

En este documento se presentan los ensayos de Mecánica de Suelos para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Se dirige a los estudiantes de la carrera de Ingeniería civil, como referencia para la elaboración de las prácticas de laboratorio. Los ensayos se componen de una breve reseña teórica la cual presenta sus términos y usos, así como los cálculos a determinar. Se describe el material y el equipo a emplear y un procedimiento ordenado, claro y sencillo. De los resultados obtenidos en los diversos ensayos, se concluye que son de vital importancia para el diseño de obras civiles.



OBJETIVO.....	V
ALCANCES.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	VII
CAPÍTULO 1. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS.....	1
1.1. Identificación Visual de los Suelos.	1
1.1.1. Dilatancia.....	4
1.1.2. Tenacidad.....	4
1.1.3. Resistencia en Estado Seco.....	5
1.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.	5
CAPÍTULO 2. CALIBRACIÓN DE EQUIPO.....	27
2.1. Calibración del Matraz.....	27
2.2. Calibración del Hidrómetro.....	33
2.3. <i>Calibración del Consolidómetro.....</i>	<i>44</i>
2.4. <i>Calibración de una Balanza Electrónica</i>	<i>46</i>
CAPÍTULO 3. PRUEBAS DE LABORATORIO DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS SUELOS.....	48
3.1. Contenido de Agua.....	48
3.1.1. <i>Contenido de Agua por Horno de Convección.....</i>	<i>48</i>
3.1.2. <i>Contenido de Agua por Horno de Microondas</i>	<i>50</i>



3.2. Gravedad Específica o Densidad de Sólidos.....	56
3.2.1. Densidad de sólidos para suelos finos.	56
3.2.2. Densidad de sólidos para suelos gruesos.	57
3.3. Relación de Vacíos y Porosidad.....	63
3.4. Pesos Volumétricos.....	70
3.4.1. Método por medio de Plastipack.	70
3.4.2. Método por medio de Cera.	71
3.5. Límites de Atterberg.....	78
3.5.1. Límite Líquido.	81
3.5.1.1. Método de la Copa de Casagrande.	81
3.5.1.2. Método del Cono Sueco.....	84
3.5.2. Límite Plástico.	93
3.5.3. Límite de Contracción.	98
3.6. Granulometría.....	104
3.6.1. Método de Tamices (Lavado y sin lavado).....	104
3.6.2. Método del Hidrómetro.	105



CAPÍTULO 4. PRUEBAS DE LABORATORIO DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS.....119

3.7. Consolidación.....	119
3.8. Permeabilidad.....	132
3.8.1. Carga Constante.....	133
3.8.2. Carga Variable	135
4.1. Compresión Simple (Deformación y Carga controlada).....	145
4.1.1. Torcómetro.....	147
4.1.2. Penetrómetro de Bolsillo.....	150
4.2. Compresión Triaxial.....	161
4.2.1. Tx_UU, Rápida (no consolidada no drenada).....	162
4.2.2. Tx_CU, Rápida consolidada (consolidada no drenada).....	163
4.2.3. Tx_CD, Lenta (consolidada drenada).....	164
4.3. Compactación.....	176
4.3.1. Proctor Estándar y Modificada.	177
4.3.2. Porter.	184
4.3.3. Cono de arena.	198
4.4. Relación de Soporte de California (CBR).....	207
CONCLUSIONES.....	214
REFERENCIAS.....	215
ANEXO I Hojas de reporte de los capítulos 1 y 2.....	217
ANEXO II Hojas de reporte de los capítulos 3 y 4.....	221



OBJETIVO.

El objetivo principal de este trabajo es de integrar un manual de laboratorio de Mecánica de Suelos, en donde se muestran las prácticas en forma clara, ordenada y sencilla, para que permitan al estudiante de ingeniería civil un mejor aprendizaje. En este manual se incluyen las prácticas de las asignaturas de Comportamiento de los Suelos y de Mecánica de Suelos, así mismo se presenta un apartado de la calibración del equipo necesario para la realización de las pruebas. Las prácticas que se presentan se apegan a las normas American Society for Testing and Materials (ASTM).

Este manual de laboratorio se realizó como apoyo o complemento y contribuye al proceso de enseñanza-aprendizaje de los alumnos de la carrera. Transmite los conocimientos principales y explica el funcionamiento de los diversos equipos de laboratorio necesarios para la enseñanza teórico-práctica, para la determinación de las propiedades índice y mecánicas de los suelos.



ALCANCES

Que el estudiante de la carrera de Ingeniería Civil conozca los procedimientos de las diferentes pruebas de laboratorio y lleve a la práctica los conocimientos teóricos que adquiere en las asignaturas de Comportamiento de los Suelos y de Mecánica de Suelos.

Este documento puede tomarse como base para la realización de los ensayos de laboratorio ya que está proyectado como complemento de los conocimientos obtenidos en la teoría de las diversas asignaturas. Se presentan los símbolos genéricos más utilizados, ya que en algunas referencias de este documento se presentan de diferente forma, por consiguiente queda a criterio del realizador del ensaye designar o tomar la nomenclatura con la que más se familiarice.

El alcance fundamental de este manual de laboratorio de Mecánica de Suelos es estudiar los procedimientos de las pruebas, de los cuales se obtienen resultados para deducir el uso más apropiado del suelo, como material de construcción o como base de sustentación de las obras de ingeniería. Para esto es necesario obtener muestras representativas (inalteradas, alteradas e integrales) del suelo para someterlas a los ensayos de laboratorio aquí mostrados.

INTRODUCCIÓN

Este documento se dirige a todos los estudiantes que por primera vez se asoman a este campo de la ingeniería, llamado Mecánica de Suelos.

Para definir el término suelo, se interpreta para el campo ingenieril, ya que se hacen usos diferentes del término, que varía de acuerdo a sus respectivos intereses.

“Es una delgada capa de la superficie terrestre que proviene de la desintegración física o química de las rocas y de las actividades de los seres vivos que sobre ellas se asientan”.

Para definir a la Mecánica de Suelos se recurre al Dr. Karl Terzaghi quien la define como:

“La Mecánica de Suelos es la aplicación de las leyes de la Mecánica y la Hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras aplicaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la desintegración mecánica o descomposición química de las rocas, independientemente de que tengan o no contenido de materia orgánica.”

El desarrollo de este campo ha aumentado el conocimiento empírico sobre los suelos, donde se hizo evidente que los resultados de las pruebas de laboratorio podrían dar conclusiones erróneas, por lo que las muestras obtenidas del terreno deben ser prácticamente inalteradas, para que las propiedades del suelo en toda su complejidad se mantengan en el espécimen extraído. Por ejemplo durante el traslado de la muestra al laboratorio ésta se puede alterar si no se le da un manejo adecuado. La protección del espécimen también es de vital importancia ya que si no se protege adecuadamente disminuye el contenido de agua del suelo. Otro factor importante es el manejo de la muestra en el laboratorio, por ejemplo, la extracción del espécimen del Tubo Shelby hasta su preparación para la prueba.

El estudio de Mecánica de Suelos, se inicia con un reconocimiento del lugar donde se analizará el suelo, esto con objeto de determinar la clase de equipo y herramienta a emplear para la obtención de muestras. Estas son llevadas al laboratorio en donde se les clasifica en un grupo y se les otorga un símbolo genérico. Cualquier intento de sistematizar su estudio debe ir acompañado de sistemas apropiados para su clasificación. De aquí parte el nacimiento del Sistema de Clasificación de Suelos: por color, olor, textura y distribución de tamaños y conformación granulométrica.

Debido a que actualmente se requiere conocer las propiedades del suelo de manera más precisa, se desarrollaron otros sistemas de clasificación relacionados con las propiedades mecánicas. El Dr. Arturo Casagrande en la Universidad de Harvard, efectuó un sistema de clasificación que satisface los campos de aplicación de la Mecánica de Suelos, este sistema se denominó en un principio Sistema de Clasificación de Aeropuertos, sin embargo, hoy se conoce como Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

En el primer capítulo de esta tesis se explica el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos y se describe su aplicación en el laboratorio y en el campo.

Una vez clasificado el suelo se determinan sus propiedades físicas y mecánicas, pero antes se debe calibrar el equipo a emplear en las pruebas. En el capítulo 2 se presenta este proceso.

Cuando se conocen las características principales de clasificación y se tiene el equipo calibrado, se desarrollan las pruebas para determinar las propiedades índice del suelo y los ensayos de consolidación y permeabilidad. Estas pruebas se muestran y se describen en el capítulo 3.

En el capítulo 4 se muestran las pruebas de Compresión simple y pruebas triaxiales para la determinación de las propiedades mecánicas del suelo. Se hace mención de métodos rápidos y prácticos para la determinación aproximada de la resistencia al corte no drenada, como el torcómetro y el penetrómetro de bolsillo. Así mismo se incluye en el mismo capítulo las pruebas de compactación y el método de laboratorio para determinar la Relación de Soporte de California (CBR) que se utiliza para el diseño de pavimentos.

Finalmente en los anexos I y II se presentan las hojas de reporte para cada uno de los ensayos descritos en este documento.

CAPÍTULO 1. “CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS”

Objetivo: Se catalogará un suelo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y se especificará su simbología de acuerdo con este sistema. Se estudiarán los suelos orgánicos, las gravas, las arenas y las arcillas. Éstas últimas se ubicarán en la Carta de Plasticidad.

1.1. Identificación Visual de Suelos (ASTM D 2488-93).

En esta sección se clasificará, en forma visual, un suelo mediante pruebas de campo. Para suelos gruesos (arenas y gravas) se utilizará el tamaño de las partículas y su forma, mientras que para suelos finos (arcillas y limos) se usará la prueba de dilatancia, de tenacidad y de resistencia al estado seco.

Introducción.

La identificación visual de suelos es fundamental en la ingeniería, ya que permite conocer el comportamiento del suelo en forma cualitativa.

Una de las ventajas de este sistema es que ofrece criterios para la identificación del suelo en el campo, es decir cuando no se dispone del equipo de laboratorio para efectuar las pruebas necesarias (Juárez, 1982).

Alcances de la práctica.

La clasificación de un suelo se hace mediante la combinación de los resultados de análisis de laboratorio. Sin embargo, en el campo el ingeniero puede efectuar pruebas sencillas que lo lleven a identificar un suelo de manera aproximada y cuando no disponga del equipo para una identificación más estricta (Crespo, 2004).

Terminología.

Angulosidad: La angulosidad de la arena (sólo tamaños gruesos), grava, y fragmentos de roca se clasifican como: angular, subangular, subredondeada y redondeada; de acuerdo con la *Tabla 1.1* y la *Figura 1.1*.



Figura 1.1 Angulosidad de las partículas gruesas

Tabla 1.1 Descripción de angulosidad de partículas de grano grueso (ASTM-D2488-93).

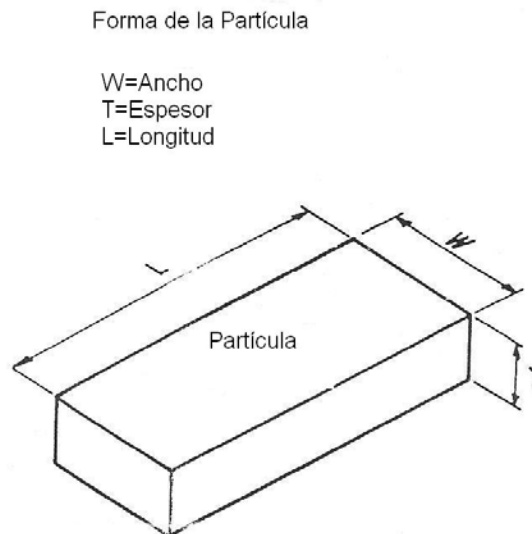
Descripción	Criterio
Angular	Las partículas tienen bordes afilados y sus lados son relativamente planos y tienen superficies ásperas.
Subangular	Las partículas son similares a la descripción angular pero tienen los bordes redondeados.
Subredondeada	Las partículas tienen sus lados casi planos pero tienen bien redondeadas las esquinas y los bordes.
Redondeada	Las partículas tienen sus lados curvos y no tiene bordes.

Forma: La forma de las gravas, y fragmentos de roca se describe con los criterios de la Tabla 1.2 y la Figura 1.2.

Tabla 1.2 Criterio para la descripción de la forma de las partículas (ASTM-D2488-93).

La longitud, la anchura y el espesor se refieren a la figura 1.2

Plana	Partícula con ancho/espesor >3
Alargada	Partícula con longitud/ancho >3
Plana y alargada	Las partículas encuentran el criterio para las dos plana y alargada.



Plana: $W/T > 3$
Alargada: $L/W > 3$

Para que se considere una partícula plana y alargada se deben cumplir ambos criterios.

Figura 1.2 Criterio de la forma de la partícula (ASTM-D2488-93).

Color: El color es una propiedad importante en la identificación de suelos orgánicos, así como en la exploración de campo para la identificación de los tipos de estratos y suelos. Si la muestra contiene capas de varios colores éstos deben ser descritos en el reporte correspondiente. Existen algunos criterios relativos al color; por ejemplo, un color oscuro indica la presencia de materia orgánica y los colores claros inorgánica (Juárez, 1982).

Olor: El olor en los suelos orgánicos es distintivo y puede usarse para su identificación. El olor es intenso si el suelo está húmedo y aumenta con el calentamiento de la muestra (Juárez, 1982).

Consistencia: Para un suelo de grano fino la consistencia se clasifica como: muy suave, suave, firme, duro y muy duro. Esta clasificación se describe en la *Tabla 1.3*. Esta clasificación no se aplica para los suelos que contienen más del 50% en peso de arenas.

Tabla 1.3 Criterio de descripción de Consistencia (ASTM-D2488-93).

Descripción	Criterio
Muy Suave	El dedo pulgar penetra el suelo más de (25mm).
Suave	El dedo pulgar penetra el suelo hasta (25mm).
Firme	El dedo pulgar penetra el suelo hasta (6mm).
Duro	El dedo pulgar no penetra el suelo pero la uña del pulgar es capaz de marcar el material.
Muy Duro	La uña del pulgar no marca el material.

Uso y significado.

La identificación de los suelos es de gran importancia en la ingeniería, ya que es posible efectuar pruebas sencillas que identifican un suelo de manera rápida y aproximada. (Crespo, 2004).

Preparación de la muestra para su clasificación.

La muestra de suelo que se usa en esta práctica corresponde a la porción de suelo que pasa el tamiz 3" (75mm). Las partículas mayores al tamiz mencionado se deben retirar manualmente.

Identificación preliminar.

El suelo es de grano fino cuando el 50% en peso o más de las partículas son finos y se debe seguir el procedimiento de identificación de grano fino. El suelo es de grano grueso si contiene menos del 50% en peso de finos y se debe seguir el procedimiento para la Identificación de grano grueso. Ambos procedimientos de identificación se explican a continuación.

Procedimiento para la Identificación de Suelos de grano fino.

Se selecciona una muestra representativa del suelo a examinar. Se deben retirar las partículas mayores al tamiz No. 40 (0.425mm) para poder realizar las pruebas de dilatancia, tenacidad y resistencia al estado seco.

1.1.1. Dilatancia.

Se hace una pastilla de aproximadamente 12 mm de diámetro con un contenido de agua necesario para que la muestra adquiera una consistencia suave, pero no pegajosa. Se coloca el suelo en la palma de la mano y se agita en el sentido horizontal, se golpea secamente contra la otra mano varias veces, manteniéndola apretada entre los dedos. Un suelo no plástico adquiere una apariencia de hígado; es decir, muestra agua en la superficie mientras se le agita, al volver apretar entre los dedos, el agua superficial desaparece. La muestra se empieza a desmoronar al aumentar la presión.

Si el contenido de agua de la pastilla es el adecuado un nuevo agitado hará que los fragmentos producidos por el desmoronamiento se vuelvan a juntar.

La velocidad con la que cambia la consistencia de la pastilla y con la que el agua aparece y desaparece indica el tipo de los finos del suelo. En arenas finas no plásticas (SP y SM) es típico que se produzca una reacción rápida, así como en algunos limos inorgánicos del tipo de polvo de roca (ML) y en tierras diatomáceas (MH). Cuando la reacción es menos rápida existen contenidos ligeros de arcilla que imparten plasticidad al suelo. La reacción en estos materiales se vuelve más lenta, como en limos orgánicos ligeramente plásticos (ML, OL), arcillas muy limosas (CL-ML) y en muchas arcillas del tipo caolín (ML, ML-CL), MH y MH-CH). Una reacción muy lenta o nula, es típica de arcillas situadas sobre la línea "A" de la carta de plasticidad (CL, CH), *Figura 1.6*; y de arcillas orgánicas de alta plasticidad (OH).

La aparición de agua en la superficie de la muestra, debido a la agitación horizontal dinámica, se presenta en suelos limosos. Lo anterior se debe a que se reduce la relación de vacíos del material, lo que provoca la expulsión de agua de éstos. En suelos arenosos este fenómeno es mayor. El amasado posterior aumenta la relación de vacíos. Los suelos arcillosos no sufren estos efectos por lo cual no hay reacción, *Tabla 1.4* (Juárez, 1982).

1.1.2. Tenacidad.

Se hace un espécimen de consistencia suave, se rola hasta formar un rollito de aproximadamente 3mm de diámetro, se amasa nuevamente y se vuelve a rolar, así varias veces. Durante estas operaciones el contenido de agua se reduce gradualmente y cuando se alcanza el límite plástico el espécimen se pone tieso, pierde plasticidad y se desmorona. Los fragmentos en que se parte o desmorona el rollito se juntan de nuevo y se amasan ligeramente entre los dedos índice y pulgar hasta que se produzca el desmoronamiento total de la muestra. El desmoronamiento total de la muestra indica que el suelo está por arriba del límite plástico.

Cuando se clasifica el suelo sobre la línea "A" de la carta de plasticidad, su comportamiento es más rígido y tenaz. Cuando el suelo se clasifica ligeramente sobre la línea "A" los rollitos son de media tenacidad y al bajar su contenido de agua, la muestra comienza a desmoronarse durante el amasado. Los suelos que se encuentran por debajo de la línea "A" son rollitos poco tenaces. En el caso de suelos orgánicos que caen muy por debajo de la línea "A" los rollitos son débiles y esponjosos, *Tabla 1.4* (Juárez, 1982).

El límite plástico y la carta de plasticidad se explica a detalle en la prueba de laboratorio, denominada Límites de Atterberg.

1.1.3. Resistencia en estado seco.

En esta prueba se amasa la muestra de suelo hasta obtener una consistencia suave, de ser necesario se debe agregar agua. Posteriormente se debe formar un cubo de aproximadamente 25mm por lado y se debe dejar secar al sol o dentro de un horno a una temperatura no mayor a las 60° (ASTM-D2488-93).

La resistencia al esfuerzo cortante del cubo se determina presionándolo entre los dedos hasta desmoronarlo o romperlo completamente. La resistencia al corte en estado seco asciende al aumentar la plasticidad del suelo; en otras palabras, mientras más plástico sea el material mayor será la resistencia al corte en estado seco (Crespo, 2004).

Los suelos exentos de plasticidad no presentan ninguna resistencia al estado seco y sus muestras se desmoronan al aplicar poca presión. Las arcillas del grupo CL o en ocasiones CH, MH, OH que se localicen muy cerca de la línea "A" presentan una resistencia media. Los suelos que se encuentran sobre la línea "A" como CH o CL, tienen una resistencia alta. Las arcillas inorgánicas que se localizan muy arriba de la línea "A" presentan una resistencia muy alta, *Figura 1.6 y Tabla 1.4* (Juárez, 1982).

Procedimiento para la Identificación de Suelos de grano grueso.

Los suelos de partículas gruesas se identifican en campo sobre una base plana, donde se extiende una muestra de suelo seca y se observa la distribución de sus partículas, sus tamaños y formas.

Para distinguir y separar gravas de arenas, se usa un flexómetro y se miden tamaños de partículas de 0.5cm, como equivalente al tamiz No. 4. Para la estimación del contenido de finos se considera un tamaño aproximadamente más pequeño al tamiz No. 200 que se puede distinguir a simple vista.

1.2. Sistema Unificado de Clasificación de suelos SUCS (ASTM D 2487-00).

Introducción.

Este sistema surge con el propósito de cubrir las necesidades correspondientes de clasificación de suelos. Se basa en sus propiedades índice, por ser éstas fundamentales en ingeniería. Entre los diversos estudios para encontrar un sistema de clasificación que satisfaga los distintos campos de aplicación a Mecánica de Suelos, destaca el efectuado por el doctor Arturo Casagrande en la Universidad de Harvard, llamado Sistema de Clasificación de Aeropuertos, debido a que estaba orientado a ese tipo de obras.

Este sistema reconoce que las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos que son menores al tamiz No 200 (suelos finos), se deducen cualitativamente a partir de su plasticidad. Para los suelos mayores al tamiz mencionado (suelos gruesos) su clasificación se basa en un análisis granulométrico.

El sistema ha sido modificado ligeramente para constituir el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El cual fue propuesto en 1942 y se adoptó por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos de América, actualmente el SUCS se usa ampliamente en todo el mundo.

Este sistema divide a los suelos en dos grandes fracciones: GRUESA. Corresponde a las partículas mayores al tamiz No 200 (0.075mm) y menores al tamiz de 3" (75mm). FINA. Está formada por las partículas que pasan el tamiz No. 200 (0.075mm). La fracción gruesa se subdivide en gravas y arenas, en las cuales el tamiz No 4 (4.75mm) se usa como frontera.

Tabla 1.4 Identificación Visual de un Suelo en Campo (González, 2004).

Identificación en el campo (excluyendo las partículas mayores de 7.6 cm y basando las fracciones en pesos estimados)				Simbolo del grupo	Nombres típicos				
Suelos de grano grueso-Más de la mitad del material es retenido por el tamiz N.º 300	Gravas más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz N.º 4	Gravas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con pocos finos o sin ellos				
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de arena y grava con pocos finos o sin ellos				
		Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	Fracción fina no plástica (para la identificación ver el grupo <i>ML</i> más abajo)	GM	Gravas limosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y limo				
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo <i>CL</i> más abajo)	GC	Gravas arcillosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla				
	Arenas más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz N.º 4	Arenas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos				
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos				
		Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	Finos no plásticos (para identificación ver el grupo <i>ML</i> más abajo)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas				
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo <i>CL</i> más abajo)	SC	Arenas arcillosas, mezclas mal graduadas y arenas y arcillas				
	Métodos de identificación para la fracción que pasa por el tamiz N.º 40								
	Suelos de grano fino-Más de la mitad del material pasa por el tamiz N.º 200 (La abertura del tamiz N.º 200 corresponde aproximadamente al tamaño de la menor partícula apreciable a simple vista)	Limos y arcillas con límite líquido menor de 50	Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Distancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia)				
Nula a ligera						Rápida a lenta	Nula	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad
Media a alta						Nula a muy lenta	Media	CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas
Ligera a media			Lenta	Ligera	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad			
Limos y arcillas con límite líquido mayor de 50		Ligera a media	Lenta a nula	Ligera a media	MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o con diatomeas, suelos limosos			
		Alta a muy alta	Nula	Alta	CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas grasas			
		Media a alta	Nula a muy lenta	Ligera a media	OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta			
Suelos altamente orgánicos			Fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa	Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos				

Los suelos que poseen características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos. P. ej., *GW-GC*, mezcla bien graduada de arena y grava. Todos los tamaños de tamices se refieren al U.S. Standard.

Los suelos formados por partículas finas se subdividen en dos grupos principales: los de baja a media compresibilidad con valores del límite líquido menor a 50% y los de alta compresibilidad con valores del límite líquido mayores a 50% (Juárez, 1982).

Alcances.

En esta sección se describe un sistema para la clasificación mineral y orgánico-mineral del suelo. Este se basa en la determinación por medio de pruebas de laboratorio para definir las características del suelo, como son: tamaño de las partículas, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. Este sistema se debe usar cuando se requiera una clasificación precisa del suelo. El grupo de símbolos se basa en pruebas de laboratorio, estas pruebas se realizan en la porción de una muestra de material que pasa el tamiz de 3" (75 mm).

Como sistema de clasificación, éste se limita a suelos de origen natural y se debe usar sólo para una descripción cualitativa. Esta práctica se basa en la Norma del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos de la ASTM. D 2487-00.

Terminología.

Grava: Partículas que pasan el tamiz de 3" (75mm) y se retienen en el tamiz No. 4 (4.75 mm). *Para este tipo de material se usa el símbolo genérico G.*

Gruesa.- Pasa el tamiz de 3" (75mm) y se retiene en el de 3/4"(19mm).

Fina.- Pasa el tamiz de 3/4" (19mm) y se retiene en el No. 4 (4.75mm).

Arena: Partículas que pasan el tamiz No.4 (4.75mm) y se retienen en el No. 200 (0.075mm). *Para este tipo de material se usa el símbolo genérico S.*

Gruesa.- Pasa el tamiz No.4 (4.75mm) y se retiene en el No. 10 (2.0mm).

Media.-Pasa el tamiz No. 10 (2.0mm) y se retiene en el No. 40 (0.425mm).

Fina.- Pasa el tamiz No. 40 (0.425mm) y se retiene en el No.200 (0.075mm).

Bien Graduado: Los tamaños de las partículas se encuentran en proporciones semejantes, desde las más pequeñas hasta las más grandes. *Para este tipo de material se usa el símbolo genérico W* (CNA, 1990).

Mal Graduado: Los tamaños de las partículas no se encuentran en proporciones semejantes. Es decir tienen un tamaño uniforme. *Para este tipo de material se usa el símbolo genérico P* (CNA, 1990).

Coeficiente de curvatura, Cc: Es el valor de $Cc = D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60})$, donde D₆₀, D₃₀ y D₁₀ son el tamaño de las partículas correspondientes a 60, 30 y 10% en la curva de distribución granulométrica. Para considerar que el material está bien graduado su valor cae entre $1 < Cc < 3$. *Cumpliendo también la característica del Cu.*

Coeficiente de Uniformidad, Cu: Es el valor de $Cu = D_{60} / D_{10}$, donde D₆₀ y D₁₀ son los diámetros de las partículas correspondientes a 60 y 10% en la curva de distribución granulométrica.

Para considerar que el material está bien graduado su valor debe ser $Cu > 4$, para las gravas; y $Cu > 6$, para las arenas. *Cumpliendo también la característica del C_c .*

Los valores D_{10} , D_{30} y D_{60} se obtienen de la prueba de granulometría. Esta prueba de laboratorio se explica más adelante (*Figura 1.7*).

Arcilla: Suelo que pasa el tamiz No. 200 (0.075mm) y exhibe plasticidad dentro de un rango de contenido de agua, y al secarse su resistencia al esfuerzo cortante aumenta. La arcilla se clasifica como suelo de grano fino con un índice de plasticidad igual o mayor a 4. En la carta de plasticidad cae en o sobre la línea "A". *Para este tipo de material se usa el símbolo genérico C.*

Limo: Suelo que pasa el tamiz No. 200 (0.075mm) y es no plástico o muy ligeramente plástico. El limo se clasifica como suelo de grano fino con un índice de plasticidad menor a 4. En la carta de plasticidad cae bajo la línea "A". *Para este tipo de material se usa el símbolo genérico M.*

Arcillas Orgánicas: Es una arcilla que contiene suficiente contenido orgánico, el cual influye en las propiedades del suelo. Con propósitos de clasificación, una arcilla orgánica es un suelo que se clasifica como arcilla, siempre y cuando el valor del límite líquido, después de haberlo secado al horno, es menor al 75% del límite líquido que no ha sido secado al horno. *Para este tipo de material se usa el símbolo genérico OL.*

Limo Orgánico: Un limo orgánico se clasifica como un suelo cuyo límite líquido, después de secado al horno, es menor al 75% del límite líquido que no ha sido secado al horno. *Para este tipo de material se usa el símbolo genérico OL.*

Turba: Es un suelo compuesto de tejido vegetal en descomposición, usualmente tiene un olor orgánico, y su color va de café oscuro a negro. Tiene una consistencia esponjosa y una textura fibrosa. *Para este tipo de material se usa el símbolo genérico PT.*

Uso y significado.

En la ilustración de la *Tabla 1.5*, se identifican tres divisiones de tamaños de suelos: el formado por granos gruesos, el formado por granos finos y los principalmente orgánicos. Estas tres divisiones son subdivisiones entre un total de 15 grupos básicos de suelo.

Con base en los resultados de observaciones visuales y pruebas de laboratorio, un suelo se clasifica de acuerdo a los grupos básicos del mismo mediante el símbolo del grupo y su nombre. La *Figura 1.3* se usa para clasificar suelos de grano fino, la *Figura 1.4* se utiliza para clasificar suelos finos orgánicos y la *Figura 1.5* se utiliza para clasificar suelos de grano grueso.

Los grupos que se describen a continuación proporcionan criterios más detallados para la identificación del suelo (Juárez, 1982).

GW y SW: Suelos bien graduados con poca cantidad de finos o limpios por completo. La presencia de los finos no debe producir cambios en las características de resistencia de la fracción gruesa, ni debe interferir con su capacidad de drenaje. La especificación es que no debe excederse la cantidad de partículas finas en un 5% en peso. Para considerar una grava bien graduada el coeficiente de uniformidad debe ser mayor que 4, y el de curvatura debe estar entre 1 y 3. En el caso de las arenas bien graduadas el coeficiente de uniformidad es mayor a 6 y el de curvatura debe estar entre los límites anteriores.

GP y SP: Suelos mal graduados, son de apariencia uniforme o presentan un predominio de un tamaño o un margen de tamaños con ausencia de algunos intermedios, los finos no deben ser mayores al 5% en peso.

GM y SM: Suelos con más del 12% en peso de finos, esto afecta a las características de resistencia, esfuerzo deformación y la capacidad de drenaje de la fracción gruesa. En estos grupos la plasticidad de los finos varía entre nula y media, es requisito que los límites de plasticidad se realicen en la fracción que pasa el tamiz No 40 (0.425mm) debajo de la línea "A" o bien que su índice de plasticidad sea menor a 4.

GC y SC: El contenido de finos debe ser mayor al 12% en peso y tiene las mismas características que el grupo GM y SM. Pero en este caso la plasticidad es de media a alta y por lo tanto la fracción que pase del tamiz No 40 se debe de situar sobre la línea "A" y el índice plástico debe ser mayor a 7.

A los suelos comprendidos entre el 5 y el 12% de finos en peso, el Sistema Unificado los considera casos de frontera. Poniéndoles un símbolo doble como: GP-GC, indica una grava mal graduada, con un contenido de 5 a 12% de finos plásticos (arcillosos). También debe usarse símbolos dobles cuando un material no cae claramente dentro de un grupo como: GW-SW material bien graduado, con menos del 5% de finos y su fracción gruesa está formada por proporciones iguales de grava y arena.

CL y CH: El grupo CL comprende a la zona sobre la línea "A" definida por el límite líquido menor a 50% y el índice de plasticidad mayor a 7. El símbolo CH comprende a la zona sobre la línea "A" definida por el límite líquido mayor a 50%.

ML y MH: el grupo ML comprende a la zona bajo la línea "A" definida por el límite líquido menor a 50% y la porción sobre la línea con índice de plasticidad menor a 4. El grupo MH comprende a la zona bajo la línea "A" definida por el límite líquido mayor al 50%.

Los suelos finos que caen sobre la línea "A" y con un índice de plasticidad mayor a 4% pero menor a 7% se consideran también como casos de frontera y se deben clasificar con un doble símbolo CL-ML.

OL y OH: La zona de estos grupos son las mismas a la de ML y MH.

PT: El límite líquido de estos suelos suele estar entre 300 y 500%. Su posición en la carta de plasticidad queda debajo de la línea "A" y el índice plástico varía entre 100 y 200% (Juárez, 1982).

Además de lo anterior se necesitan: una carta de plasticidad, similar a la *Figura 1.6*, y una curva de distribución granulométrica, similar a la *Figura 1.7*.

Símbolo del grupo

Nombre del grupo

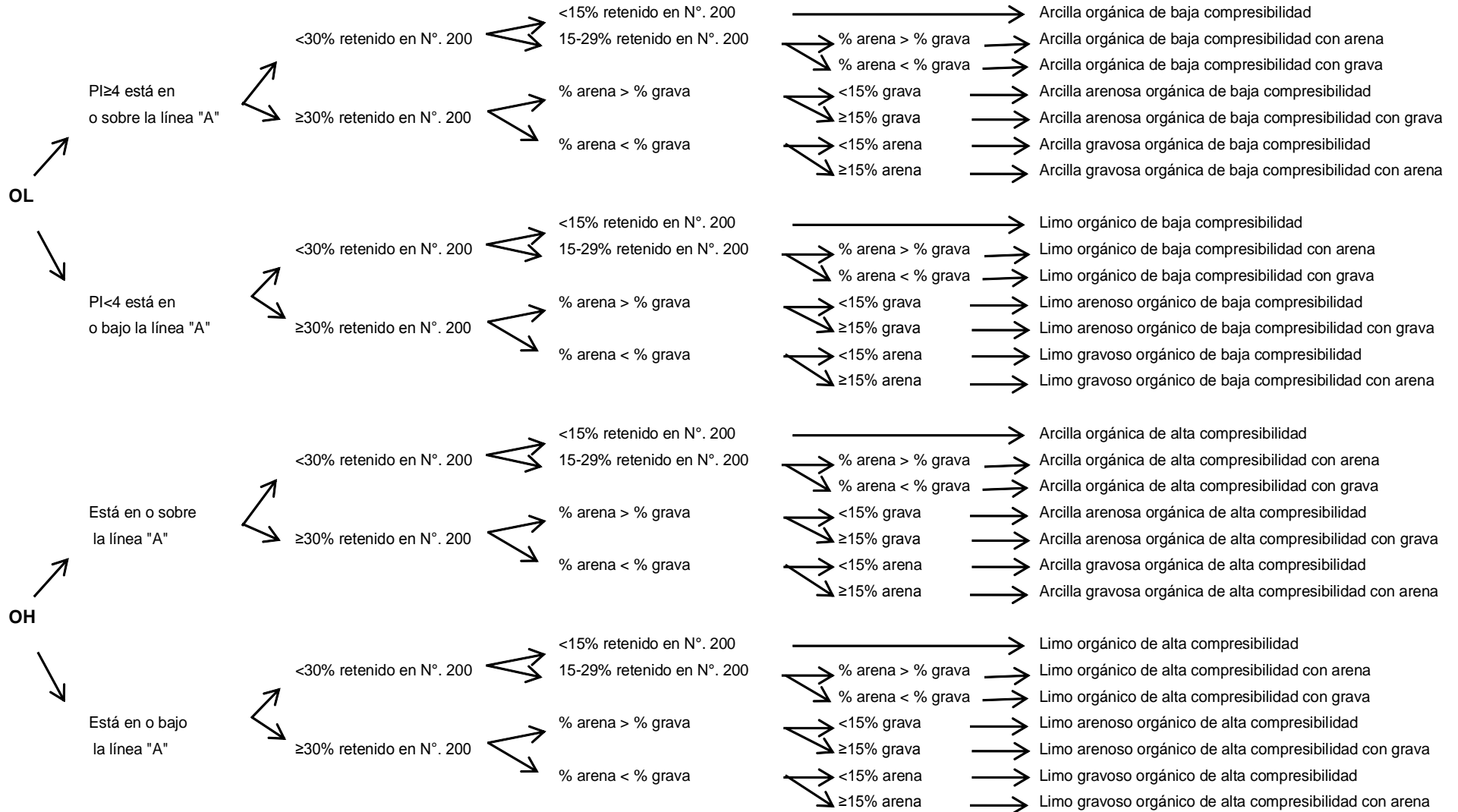


Figura 1.4 Suelos Finos Orgánicos (Sánchez, 2003).

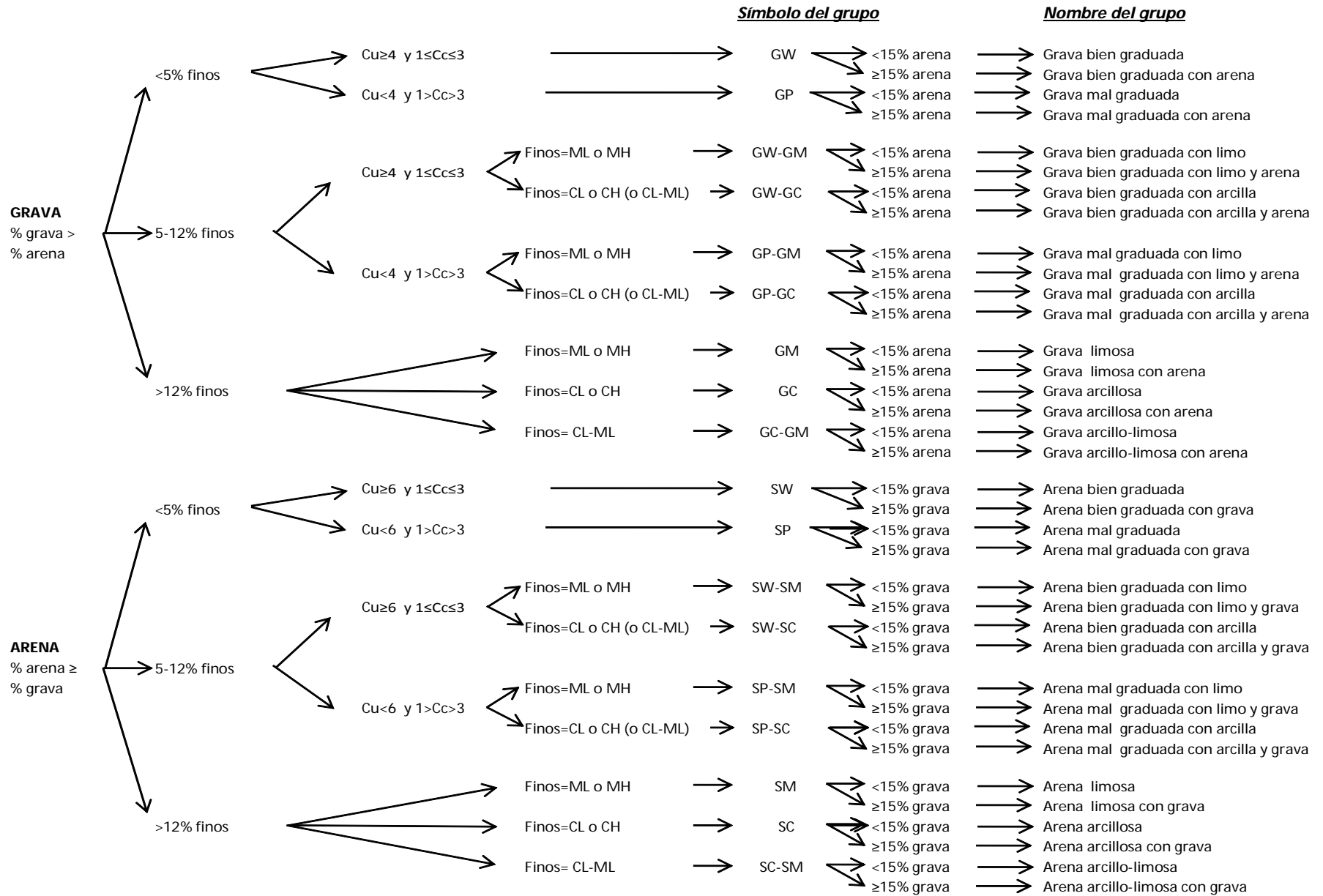


Figura 1.5 Suelos Gruesos (Sánchez, 2003).

Tabla 1.5 Clasificación del Suelo. (ASTM-D2487-98)							
Criterio para el grupo de símbolo asignado y nombre del grupo usado en pruebas de laboratorio (a)				Clasificación del Suelo			
				Símbolo del Grupo	Nombre del Grupo (b)		
Suelos de grano grueso Más del 50% retenido en el tamiz No. 200	Gravas Más del 50% de la fracción granular retenidos en el tamiz No. 4	Gravas limpias	Cu>4 y 1<Cc<3 (e)	GW	Grava bien graduada (f)		
		Menos del 5% de finos (c)	Gravas con más del 12% de finos (c)	Finos clasificados como ML o MH	Grava mal graduada (f)		
					Grava con finos no plásticos Grava limosa (f,g,h)		
		Finos clasificados como CL o CH	Grava con finos plásticos Grava arcillosa (f,g,h)				
	Arenas 50% o mas de la fracción granular pasa el tamiz No. 4		Arenas limpias	Cu>6 y 1<Cc<3 (e)	SW	Arena bien graduada (i)	
		Menos del 5% de finos (d)	Arenas con más del 12% de finos (d)	Finos clasificados como ML o MH	Arena mal graduada (i)		
					Arena con finos no plásticos Arena limosa (g,h,i)		
		Finos clasificados como CL o CH	Arena con finos plásticos Arena arcillosa (g,h,i)				
			Suelos de grano fino 50% o más pasan el tamiz No. 200	Limos y Arcillas Limite líquido menor que 50	Orgánico	PI>7 y en o sobre a la línea "A"	CL
		Inorgánico			Limite líquido-secado al horno <0.75 Limite líquido-no secado < 0.75	PI<4 o debajo de la línea "A"	ML
OL	Arcilla orgánica (k,l,m,n)						
Limos y Arcillas Limite líquido 50 o más	Orgánico	IP en o anterior a la línea "A"		IP debajo de la línea "A"	CH	Arcilla de alta compresibilidad (k,l,m)	
			MH		Limo de alta compresibilidad (k,l,m)		
Inorgánico	Limite líquido-secado al horno <0.75 Limite líquido-no secado < 0.75	OH	Arcilla orgánica (k,l,m,p)				
			Limo orgánico (k,l,m,q)				
Suelos altamente orgánicos	Principalmente materia orgánica, color oscuro y olor orgánico	PT	Turba				

Descripción de la Tabla 1.5. Clasificación de Suelo.

- a) Basado en el material que pasa el tamiz 3" (75mm).
- b) Si la muestra de campo contiene fragmentos de roca, agregue al nombre del grupo el término: (*con fragmentos de roca*).
- c) Gravas con 5 a 12% en peso de finos requiere doble símbolo:
GW-GM Grava bien graduada con limos
GW-GC Grava bien graduada con arcilla
GP-GM Grava mal graduada con limo
GP-GC Grava mal graduada con arcilla
- d) Arenas con 5 a 12% en peso de finos requiere doble símbolo:
SW-SM Arena bien graduada con limos
SW-SC Arena bien graduada con arcilla
SP-SM Arena mal graduada con limo
SP-SC Arena mal graduada con arcilla
- e) $C_u = D_{60}/D_{10}$ $C_c = (D_{30}^2/D_{10} \times D_{60})$
- f) Si un suelo contiene >15% en peso de arena, agregue al nombre de grupo el término: (*con arena*).
- g) Si los finos que contiene el material son clasificados como CL-ML, se usa doble símbolo por ejemplo GC-GM, o SC-SM.
- h) Si los finos son orgánicos, agregue al nombre de grupo el término: (*con finos orgánicos*).
- i) Si el suelo contiene >15% en peso de grava, agregue al nombre del grupo el término: (*con grava*).
- j) Si los límites de Atterberg se encuentran en la carta de plasticidad, antes de la línea A y entre el rango de $4 < PI < 7$ se especifica un doble signo: CL-ML, limo arcilla.
- k) Si el suelo contiene entre 15 a 29% en peso de material que se retiene antes del tamiz No 200, agregue el término predominante: (*con arena o con grava*).
- l) Si el suelo contiene >30% en peso de material predominantemente arena, agregue al nombre del grupo el término: (*arena*).
- m) Si el suelo contiene >30% en peso de material predominantemente grava, agregue al nombre del grupo el término: (*grava*).
- n) Si $PI > 4$ el suelo se ubica sobre la línea A.
- o) Si $PI < 4$ el suelo se ubica debajo a la línea A.
- p) PI sobre a la línea A.
- q) PI debajo a la línea A.

A continuación se describe la preparación de la muestra de suelo para su clasificación.

Para la realización de la prueba de clasificación de suelos, se requiere de un peso seco mínimo del material. En la *Tabla 1.6* se muestran dichas cantidades en donde también se considera el peso del material de reserva que siempre debe considerarse con el fin de repetir la prueba en caso de que los resultados no sean consistentes o se quiera verificar algún resultado de la prueba.

Tabla 1.6. Peso seco mínimo de material.

Tamaño máximo de las partículas	Peso seco de la muestra.
4.75 mm (No 4)	100g
9.5 mm (3/8 in)	200g
19.0 mm (3/4 in)	1.0kg
38.1 mm (1 ½ in)	8.0kg
75.0 mm (3 in)	60.0kg

Con objeto de realizar las pruebas de límite líquido y plástico a los pesos secos, que se muestran en la *Tabla 1.6*, se les debe añadir un peso adicional de entre 150g a 200g de suelo fino (material que pasa el tamiz No 40).

Para clasificar un suelo por medio de una curva granulométrica se debe usar el material mayor al tamiz No 200. Para determinar las características de plasticidad se debe usar el material que pasa el tamiz No 40.

Para suelos con un contenido menor al 5% en peso de finos, se requiere dibujar la distribución de la curva granulométrica de la fracción gruesa que se retiene en el tamiz No. 200 (0.075 mm). En el eje de las abscisas se usa una escala semi-logarítmica y se marca el tamaño de las partículas o número del tamaño de los tamices, en el eje de las ordenadas se especifica el porcentaje de suelo que pasa en escala aritmética; tal y como se muestra en la *Figura 1.7*.

Para suelos con un contenido de 5 a 15% en peso de finos, se requiere dibujar una curva de distribución granulométrica acumulativa como se describe en el párrafo anterior y también se requiere determinar el límite líquido e índice de plasticidad.

Para suelos con un contenido de 15% en peso de finos o más, se requiere determinar los porcentajes de finos, arenas y gravas, así como el límite líquido e índice de plasticidad.

Para suelos que contienen 5% en peso de finos o más, se debe utilizar la carta de plasticidad.

Si el suelo de grano fino pasa el 50% o más del peso seco de la muestra por el tamiz No 200(0.075mm) se debe realizar lo que se indica en la sección "Procedimiento para la Clasificación de Suelos de grano fino" que se incluye a continuación.

Si el suelo de grano grueso se retiene más del 50% del peso seco de la muestra por el tamiz No 200 (0.075mm) se debe realizar lo que se indica en la sección “Procedimiento para la Clasificación de Suelos de grano grueso” que se incluye más adelante.

Cuarteo de la muestra de suelo.

El proceso de reducir a un tamaño conveniente una muestra de material se llama cuarteo. Este procedimiento se emplea frecuentemente en muestras de campo, cuando el volumen de material que se obtiene al muestrear un pozo sobre pasa la cantidad que se necesita remitir al laboratorio.

A continuación se presenta el procedimiento de cuarteo de muestras en el laboratorio para su ensayo.

- 1.- Designar un lugar limpio para el cuarteo y vaciar el material.
- 2.- Revolver el material varias veces en forma de cono hasta obtener una mezcla uniforme.
- 3.- Con ayuda de la pala extender el material formando una capa de espesor uniforme y contorno circular.
- 4.- Dividir en cuatro partes iguales la capa de material, trazando dos diámetros a 90°.
- 5.- Tomar el material de dos cuartos opuestos y retirara la parte sobrante. Esta operación reduce a la mitad el tamaño de la muestra y debe repetirse las veces que sea necesario hasta obtener el tamaño deseado.

Procedimiento para la Clasificación de Suelos de grano fino.

El suelo se clasifica como una arcilla inorgánica si su posición, en la carta de plasticidad, cae sobre la línea “A” y el índice de plasticidad es mayor a 4, y la presencia de materia orgánica no influye en el límite líquido.

El suelo se clasifica como una arcilla de baja compresibilidad, CL, si el límite líquido es menor que 50%. Ver el área identificada como CL en la *Figura 1.6*.

El suelo se clasifica como una arcilla de alta compresibilidad, CH, si el límite líquido es igual o mayor que 50%. Ver el área identificada como CH en la *Figura 1.6*.

En caso de que el límite líquido exceda de 100% o el índice de plasticidad de 60%, la carta de plasticidad debe ser expandida pero deberá mantener la escala en ambos ejes y expandir la línea “A” con la misma pendiente que se indica en la *Figura 1.6*.

El suelo se clasifica como una arcilla limosa si la posición en la carta de plasticidad cae en o sobre la línea “A” y el índice de plasticidad está en el rango de 4 a 7.

El suelo es un limo inorgánico si en la carta de plasticidad cae bajo la línea “A” o el índice de plasticidad es menor a 4 y la presencia de materia orgánica no influye en la determinación del límite líquido.

El suelo se clasifica como un limo, ML, si el límite líquido es menor que 50%. Ver el área identificada como ML en la *Figura 1.6*.

El suelo se clasifica como un limo plástico, MH, si el límite líquido es mayor que 50%. Ver el área identificada como MH en la *Figura 1.6*.

El suelo es un limo o una arcilla orgánica, si el material orgánico se presenta en cantidad suficiente para influir en el límite líquido.

Si el suelo tiene un color oscuro y un olor orgánico en estado húmedo, se debe realizar una segunda prueba del límite líquido en una muestra que ha sido secada al horno de convección a una temperatura de $105\pm^{\circ}\text{C}$ y peso constante durante 12 horas aproximadamente.

El suelo es un limo o una arcilla orgánica si el límite líquido, después de secado al horno, es menor que el 75% del límite líquido del espécimen original que se determinó antes de secarlo al horno.

El suelo se clasifica como un limo o arcilla orgánica, OL, si el límite líquido (sin haber sido secado al horno) es menor que 50%. El suelo se clasifica como un limo orgánico, OL, si el índice de plasticidad es menor a 4 o la posición en la carta de plasticidad cae bajo la línea "A". El suelo se clasifica como una arcilla orgánica, OL si el índice de plasticidad es 4 o mayor y la posición en la carta de plasticidad cae en o sobre la línea "A". Ver el área identificada como OL o CL-ML en la *Figura 1.6*.

El suelo se clasifica como una arcilla o un limo orgánico, si el límite líquido (sin haber sido secado al horno) es 50% o mayor. El suelo se clasifica como un limo orgánico, OH, si la posición en la carta de plasticidad cae bajo la línea "A". El suelo se clasifica como una arcilla orgánica, OH, si la posición en la carta de plasticidad cae en o sobre la línea "A". Ver el área identificada como OH en la *Figura 1.6*.

Si un 15 a 30% en peso del espécimen de la prueba es retenido en el tamiz N°. 200 (0.075mm) usar las palabras con arena o con grava (cualquiera que sea predominante) y asignarlo al nombre del grupo. Por ejemplo arcilla con arena, un limo de baja compresibilidad con grava, ML. Si el porcentaje de grava es igual al porcentaje de arena, se usa con arena.

Añadir la palabra *gravosa* si el 30% en peso o más del espécimen se retiene en el tamiz No 200 (0.075mm) y en la porción es predominante la grava. Por ejemplo, *arcilla arenosa* CL; *arcilla gravosa* CH. Si el porcentaje de arena es igual al de grava, se usa *arenosa*.

Procedimiento para la Clasificación de Suelos de grano grueso.

Si más del 50% en peso del material se retiene en el tamiz No 200 (0.075mm), la muestra de suelo se clasifica como: Grava, si más del 50% en peso de la fracción gruesa se retiene en el tamiz No 4 (4.75mm). Arena, si más del 50% en peso de la fracción gruesa pasa el tamiz No 4 (4.75mm).

Si el 12% en peso de la muestra o menos pasa el tamiz No 200 (0.075mm) se traza la distribución granulométrica, *Figura 1.7* y se determina el coeficiente de uniformidad, C_u ; y el coeficiente de curvatura, C_c , con las ecuaciones.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \dots\dots\dots (1-1)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

Si el espécimen que pasa el tamiz No.200 es menor al 5% en peso, clasificar al suelo como una grava bien graduada, GW, o arena bien graduada SW, si C_u es mayor o igual 4 para gravas o más de 6 para arenas y C_c es entre 1 pero no más de 3.

Si el espécimen que pasa el tamiz No.200 es mayor al 5% en peso, clasificar al suelo como una grava mal graduada GP, o una arena mal graduada SP, si los valores de C_u y C_c para el criterio de bien graduados no están dentro de lo especificado.

Si más del 12% en peso del espécimen pasa el tamiz No 200(0.075mm), el suelo se considera de grano grueso con finos. Los finos son determinados como arcillas o limos, según la carta de plasticidad.

El suelo se clasifica como una grava arcillosa, GC, o arena arcillosa, SC, si los finos son arcillas, según la posición en la carta de plasticidad; es decir para que el suelo se clasifique de esta manera, debe caer sobre la línea "A" y tener un $PI > 7$.

El suelo se clasifica como una grava limosa, GM, o arena limosa, SM, si los finos son limos, según la posición en la carta de plasticidad; es decir para que el suelo se clasifique de esta manera, debe caer en o bajo la línea "A" y tener un $PI < 4$.

Si la muestra de suelo pasa el tamiz No 200 (0.075mm) con un porcentaje de entre 5 a 12% en peso, el suelo se clasifica con un doble símbolo. El primer grupo de símbolos corresponde a una grava o una arena que tiene menos del 5% en peso de finos (GW, GP, SW, SP), el segundo símbolo corresponde a una grava o arena que tiene más del que 12% en peso de finos (GC, GM, SC, SM).

El nombre del grupo debe corresponder al primer símbolo del grupo, y además se debe añadir "con arcilla" o "con limo" al indicar las características de plasticidad de los finos. Por ejemplo: grava bien graduada con arcilla, GW-GC; arena mal graduada con limos, SP-SM.

Si en el espécimen es predominantemente arena o grava, pero contienen 15% en peso o más de otro grano grueso, las palabras "con grava" o "con arena" deben ser añadidas en el nombre del grupo. Por ejemplo: grava mal graduada con arena, arena arcillosa con grava.

Si la muestra de campo contiene algunos fragmentos de roca, la palabra “con fragmentos de roca” se deben añadir al nombre del grupo. Por ejemplo: grava limosa con fragmentos de roca, GM.

Reporte.

El reporte debe incluir el nombre del grupo, el símbolo del grupo y los resultados de la prueba de laboratorio y de campo. La distribución granulométrica se debe dibujar en función del porcentaje de grava, arena y finos.

Carta de Plasticidad SUCS

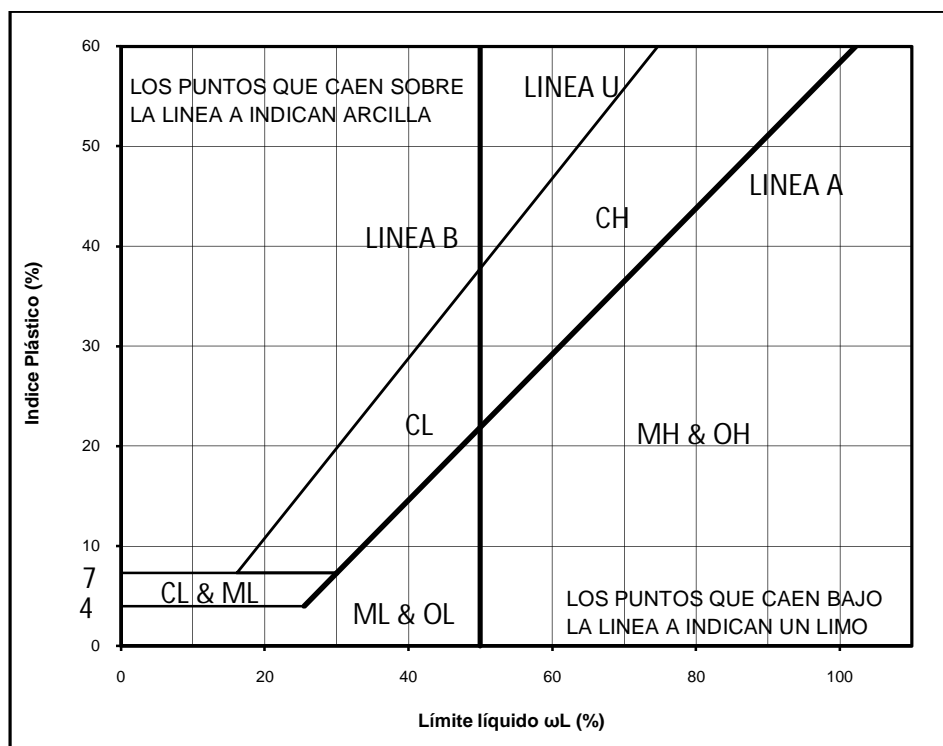
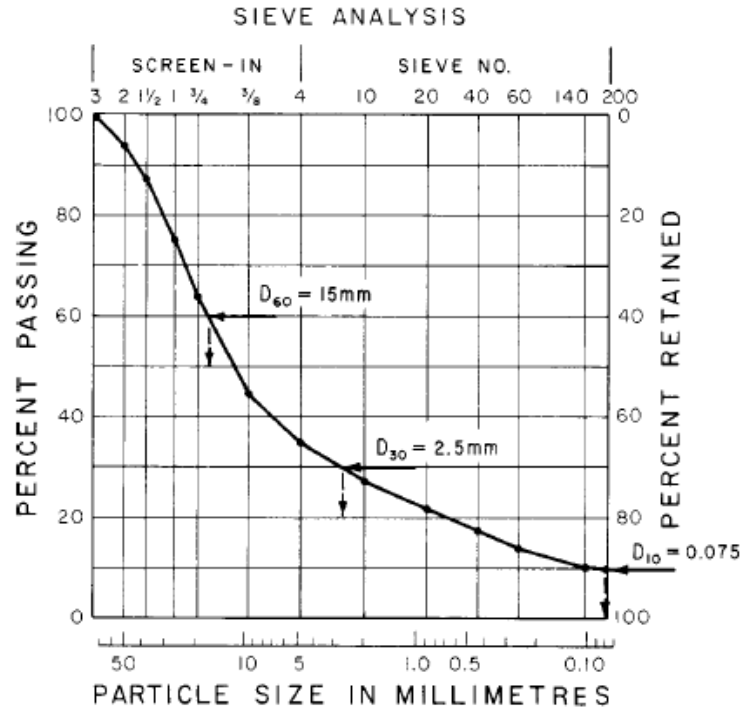


Figura 1.6 Carta de Plasticidad.



$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{15}{0.075} = 200 \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(2.5)^2}{0.075 \times 15} = 5.6$$

Figura 1.7 Curva granulométrica (ASTM-D2487-98).

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 1

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS.”

Práctica No. 1

Objetivo: Conocer el tamaño de las partículas sólidas del suelo con la clasificación mediante tamices e identificar de forma visual y al tacto las muestras de suelo fino por medio de las pruebas de Dilatancia, Tenacidad y Resistencia en Estado Seco.

Identificación visual de suelos.

Herramienta y Equipo.

- Cuchillo de bolsillo o una espátula pequeña de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho con punta redonda.
- Charolas de lámina galvanizada, rectangular de 40x70x10 cm.
- Horno eléctrico a una temperatura de $105\pm^{\circ}\text{C}$.

Material.

- Suelo.
- Agua destilada.

Procedimiento para la identificación visual y al tacto de suelos finos.

Dilatancia.

- 1.- Tomar una porción pequeña de suelo fino.
- 2.- De ser necesario, añadir gotas de agua destilada para obtener una consistencia suave pero no pegajosa.
- 3.- Colocar la masa de suelo en una de las manos y con la otra efectuar un golpeo horizontal para generar la salida de agua hacia la superficie de la masa de suelo.
- 4.- La salida de agua de la muestra hacia la superficie indica el tipo de suelo fino.

Tenacidad.

- 1.- Tomar una porción pequeña de suelo fino.
- 2.- De ser necesario, añadir gotas de agua para obtener una consistencia suave pero no pegajosa.
- 3.- Formar con las palmas de las manos un rollito de aproximadamente 3mm de diámetro, *Figura 1.8*.



Figura 1.8 Rollito de suelo.

- 4.- Amasar y volver a realizar el rollito.
- 5.- Repetir el paso 4 varias veces hasta su desmoronamiento.
- 6.- Estimar la resistencia que opone el rollito de suelo durante el amasado, *Tabla 1.1 de la hoja de reporte*.

Resistencia en estado seco.

- 1.- Tomar una muestra de suelo fino.
- 2.- Realizar un cubo de 1cm^3 .
- 3.- Colocar el cubo en el horno o en la placa eléctrica y retirarlo hasta que éste se vea seco, *Figura 1.9*.



Figura 1.9 Secado de la muestra.

- 4.- Colocar la muestra entre los dedos pulgar e índice.
- 5.- Presionar el cubo firmemente, *Figura 1.10*.



Figura 1.10 Presión sobre el cubo.

- 6.- Estimar la dificultad de rotura del cubo de suelo.

Con ayuda de la *Tabla 1.1* incluida en la hoja de reporte identificar el tipo de suelo fino.

Clasificación de los Suelos.

Herramienta y Equipo.

- Tamices de 3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", No. 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Balanza con 120 kg de capacidad y aproximación de 10 grs.
- Máquina cribadora de acción mecánica, activada por un motor eléctrico.
- Horno de convección a una temperatura de 105±°C.
- Cepillos con las dimensiones y cerdas adecuadas para desprender el material adherido de los tamices.
- Charolas de lámina galvanizada, rectangular de 40x70x10 cm.
- Cucharón de 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura.
- Mazo de madera con masa de 1 kg de forma prismática rectangular, de 15 cm de altura y 9.5 cm de base por lado.
- Pala de acero de forma rectangular.
- Recipientes con tapa y dimensiones suficientes para contener la porción de la muestra retenida en los tamices, resistente a la corrosión y a las altas temperaturas.

Material.

- Suelo.
- Agua destilada.
- Bolsas de plástico.

Procedimiento para la clasificación por medio de tamices.

- 1.- Realizar el cuarteo del material hasta tener la cantidad necesaria, según la *Tabla 1.6*. Tomar la fracción de la muestra debidamente secada al horno y determinar su peso.
- 2.- Colocar la muestra en una charola metálica para disgregar los grumos formados en la muestra con un mazo de madera.
- 3.- Lavar el suelo previamente disgregado con el tamiz No. 200 para quitar las partículas finas.
- 4.- Vaciar el material retenido en el tamiz No. 200 en un recipiente e introducirlo al horno para su secado.
- 5.- Retirar la muestra de suelo del horno y determinar su peso.
- 6.- Colocar los tamices en orden progresivo desde el tamiz 3" hasta el No. 200, *Figura 1.11*.



Figura 1.11 Juego Tamices

7.- Vaciar la fracción de la muestra seca poco a poco por el tamiz de 3" y se coloca la tapa, *Figura 1.12*.



Figura 1.12 Vaciado de material

8.- Posteriormente, los tamices se deben agitar vigorosamente en forma horizontal con un movimiento de rotación y en forma vertical con pequeños golpes o colocarlo en la máquina cribadora, *Figura 1.13*. El tiempo mínimo de agitado es de 15 minutos.



Figura 1.13 Agitado de los tamices.

9.- Retirar la tapa y se separar cuidadosamente los tamices. La porción retenida se debe vaciar en un recipiente de peso conocido, posteriormente se debe pesar la porción retenida más el recipiente y determinar el peso retenido en el tamiz, *Figura 1.14*. Este procedimiento se repite para cada uno de los tamices.



Figura 1.14 Peso del material retenido.

10.- Utilizar la hoja de reporte y completar la información que se pide. Mediante los pesos retenidos se calcula el porcentaje que pasa para la clasificación del suelo. Una vez realizado el procedimiento anterior se debe clasificar el suelo con ayuda de la *Tabla 1.2* incluida en la hoja de reporte.

11.- Dibujar la curva granulométrica y determinas los valores de C_u y C_c .

12.- Clasificar el suelo mediante los datos obtenidos.

CAPÍTULO 2. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.

Objetivo: Obtener la calibración de los equipos a utilizar para la correcta realización de las pruebas de los laboratorios de Comportamiento de los Suelos y de Mecánica de Suelos.

2.1. CALIBRACIÓN DEL MATRAZ (ASTM D854-92).

En este capítulo se determina el peso y la temperatura inicial de un matraz de 500 cm^3 lleno de agua destilada y se realiza la gráfica peso del matraz -temperatura en escala aritmética.

Introducción.

Un matraz volumétrico o aforado es un recipiente con forma de pera, fondo plano, de cuello largo y delgado. Suelen fabricarse con materiales como vidrio, vidrio borosilicatado o polipropileno. Tienen una marca de graduación que rodea todo el cuello del matraz, por lo cual es fácil determinar con precisión cuándo el líquido llega hasta la marca. La forma correcta de aforar el matraz es llevar el líquido hasta que la parte inferior del menisco sea tangente a la marca, esta operación se conoce como "enrasar". A causa de la modificación del volumen de los líquidos y del vidrio con los cambios de temperatura se debe aforar el matraz cuando se vaya a utilizar a una temperatura diferente a la atmosférica.

Terminología.

Balanza: De 2 kg de capacidad y 0.01 grs de precisión, ajustada a ceros antes de pesar el matraz.

Termómetro: Capaz de medir el rango de temperatura de 0 a 50°C de la prueba que se realiza, con una graduación a cada 0.1°C.

Errores Posibles.

La báscula puede producir errores en la medición de los pesos ya que las básculas utilizadas en el laboratorio han sido muy usadas. Otro error posible es que el menisco no resulte perfectamente a nivel de la marca de enrase, es de notar que una gota de agua puede dar un error de peso de 0.05 gr (Juárez, 1982).

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 2

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“CALIBRACIÓN DEL MATRAZ.”

Práctica No.2.

Calibración del Matraz.

Objetivo: Determinar el peso y la temperatura iniciales de un matraz lleno de agua destilada. Aumentar su temperatura hasta los 40 °C y disminuir poco a poco en un rango de entre 2 y 3°C hasta llegar nuevamente a la temperatura y peso iniciales. Realizar la gráfica peso del matraz -temperatura en escala aritmética.

Herramienta y Equipo.

- Matraz de cuello largo de 500 cm^3 de capacidad.
- Parrilla eléctrica.
- Termómetro de mercurio de 0 a 50°C con una graduación a cada 0.1°C.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Cuenta gotas o Pipeta de vidrio.
- Embudo de vidrio o plástico.
- Guantes.
- Piseta.



Figura 2.1 Herramienta y equipo para calibración del matraz.

Material.

- Agua destilada.
- Toalla.
- Cubeta con agua.
- Papel secante.
- Dicromato de potasio.
- Acido sulfúrico.
- Alcohol.
- Eter sulfúrico.

Procedimiento.

1.- Limpiar perfectamente el matraz.

Para realizar la calibración adecuadamente, el matraz debe estar limpio y seco. A continuación se presenta el procedimiento de limpieza.

a.- Prepare una mezcla crómica, disolviendo 60 gr. de dicromato de potasio caliente en 300 cm^3 de agua destilada. Deje enfriar la solución, posteriormente añada en frío 460 cm^3 de ácido sulfúrico de tal manera que escurra por las paredes del recipiente en que se forma la solución.

b.- Enjuague el matraz con la mezcla crómica para eliminar la grasa que pueda tener adherida en su interior, enjuáguese de nuevo con agua destilada y escúrrase perfectamente para bañar el interior de alcohol y eliminar los residuos de agua. Finalmente enjuague el matraz con éter sulfúrico y colocarlo con la boca libre hacia abajo durante 10 minutos.

c.- Si no se tiene la mezcla crómica se puede sustituir por una solución jabonosa, repitiendo el paso b (Juárez, 1982).

2.-Determinar el peso del matraz W_f .

3.-Llenar el matraz con agua destilada. Aproximadamente 0.5 cm debajo de la marca de enrase.

4.-Con el uso de la pipeta aforar el matraz de tal manera que la parte inferior del menisco coincida con la marca de enrase. *Figura 2.2.*

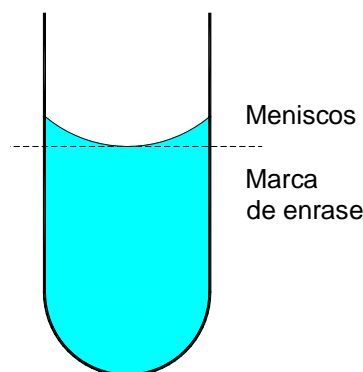


Figura 2.2 Aforo del matraz a la marca de enrase.

5.-Limpiar el interior del cuello del matraz perfectamente con el papel secante enrollado para quitar las gotas de agua destilada. Respetando el menisco.

6.-Determinar el peso del matraz lleno de agua destilada.

7.-Uniformizar la temperatura del matraz girándolo cuidadosamente en sentido horizontal y posteriormente se debe determinar su temperatura con el termómetro. El bulbo del termómetro debe colocarse al centro del matraz. *Figura 2.3.*

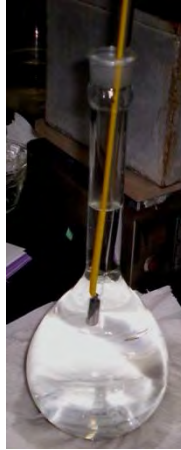


Figura 2.3 Medición de la temperatura.

8.-Incrementar la temperatura del matraz colocándolo en la parrilla eléctrica hasta llegar aproximadamente a los 40°C.

9.-Repetir los pasos 4 a 7.

10.-Bajar la temperatura del agua en un rango de entre 2 y 3°C.

11.-Repetir los pasos 4 a 7 hasta llegar a la temperatura inicial.

12.-Trazar la curva de calibración.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

Curva de calibración. En las ordenadas se grafica el peso del matraz más agua destilada, en gramos y en las abscisas se grafica la temperatura en °C. Se debe determinar la línea de tendencia, utilizando el método de regresión lineal con mínimos cuadrados como se muestra en la Figura 2.4.

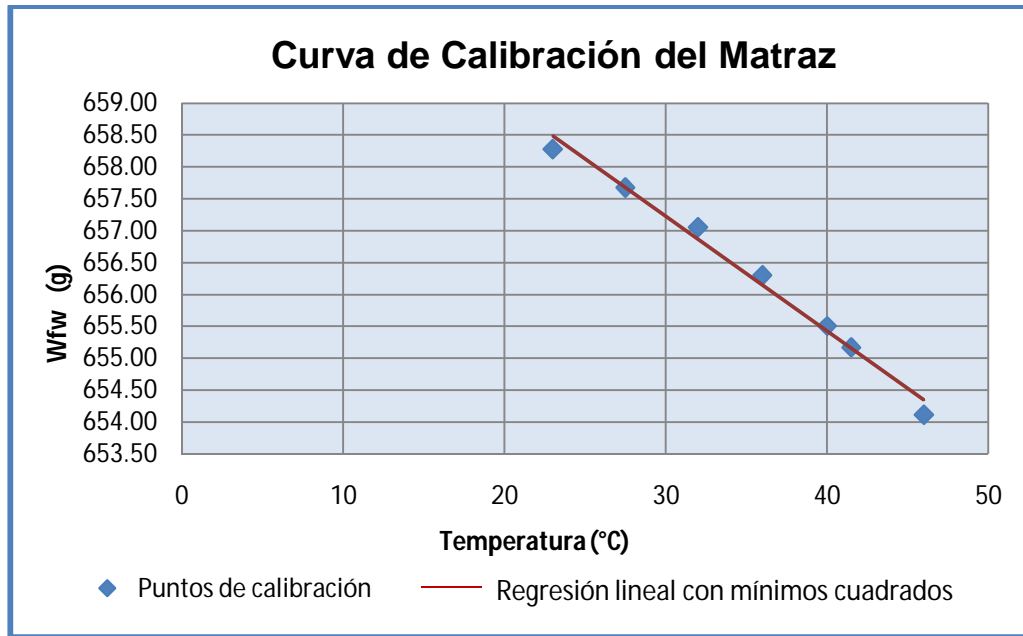


Figura 2.4 Ejemplo de la curva de calibración del matraz.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

2.2. CALIBRACIÓN DEL HIDRÓMETRO (ASTM D422-98).

Objetivo: Determinar la altura de caída (H) de partículas de suelo menores al tamiz No. 200 en función de las lecturas realizadas en el hidrómetro.

Introducción.

El método del hidrómetro es un análisis que se basa en la Ley fundamental de Stokes, la cual enuncia que la velocidad de sedimentación de las partículas de un líquido, está en función del tamaño.

Los hidrómetros o densímetros se calibran para medir la relación del peso específico de un líquido con respecto al del agua, a una cierta temperatura de calibración que generalmente suele ser 20°C.

Terminología.

Hidrómetro: Un hidrómetro graduado lee la gravedad específica de la suspensión en gramos por litro.

Cilindro de sedimentación: Vaso cilíndrico esencialmente de 18 pulgadas (457 mm) de altura y 2 1/2 pulgadas (63.5 mm) de diámetro y marcado para un volumen de 1000 cm^3 .

Uso y significado.

El hidrómetro se sumerge en una suspensión dentro del cilindro de sedimentación, hasta que su peso se equilibre con el peso de la suspensión desplazado por él. De esta manera se mide el peso específico promedio de la suspensión desplazada. La calibración de un hidrómetro consiste en determinar, para un aparato dado, la verdadera altura de caída (H) en función de las lecturas realizadas (Juárez, 1982).

Comprobación de la escala del hidrómetro.

Comprobar la escala del hidrómetro ya que ésta puede desplazarse dentro del vástago y provocar resultados erróneos. Se preparan soluciones de sal químicamente pura, en concentraciones de 8, 16 y 24 gramos de sal, de tal manera que junto con agua destilada formen 500 cm^3 de solución. Observar las lecturas del hidrómetro en cada una de las soluciones y comparar las mismas con las calculadas para cada caso. La preparación de las soluciones se presenta a continuación: (CNA, 1990).

- a) Obtener las cantidades de 8, 16 y 24 gramos de sal perfectamente seca.
- b) Introducir cada porción en los matraces calibrados de 500 cm^3 , llenar con agua destilada hasta la marca de aforo.
- c) Determinar el peso de los matraces con la solución y así mismo tomar la temperatura del líquido.
- d) Determinar el peso volumétrico de la solución con la ecuación (2-1).

$$\gamma_m = \frac{\text{Peso solución}}{\text{Volumen solución}} \dots\dots\dots (2-1)$$

Para obtener el volumen de la solución se utiliza la fórmula:

$$\text{Vol. Sol.} = \frac{\text{Peso del agua que llena el matraz}}{\text{Peso volumétrico del agua a la temperatura de operación}} \dots\dots\dots(2-2)$$

En la figura 2.5 se encuentran los valores de la densidad del agua destilada a temperaturas de 0° a 40°C.

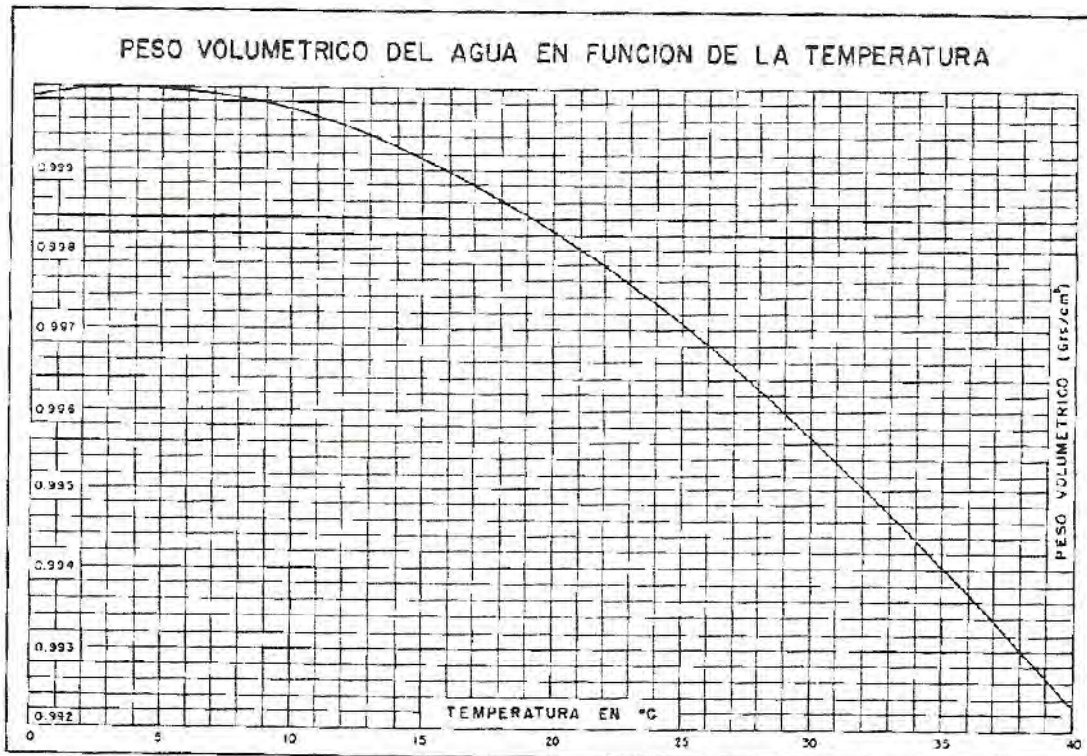


Figura 2.5 Gráfica de Peso Volumétrico del agua en función con la temperatura (CNA, 1990).

- e) Pasar una de las soluciones del matraz a la probeta de 500 cm³ e introducir el hidrómetro y tomar la lectura bajo el menisco.
- f) Repetir la operación para cada una de las soluciones y para agua destilada sola. A cada una de las lecturas realizar la corrección por temperatura como se indica en la prueba de granulometría por el método del hidrómetro.

g) Calcular las lecturas con la ecuación (2-3) que el hidrómetro debe dar si la escala es correcta.

$$W_s = \frac{1000 (\gamma_m - 1) G_s}{G_s - 1} \dots\dots\dots (2-3)$$

Donde:

W_s = Lectura en gr /lt que debe leerse en el hidrómetro.

γ_m = Peso volumétrico de la solución.

G_s = 2.65 (valor constante para todos los hidrómetros).

Cálculos.

Determinación de la distancia efectiva de caída.

La determinación de H_1 se realiza con la ecuación (2-4), en donde se obtiene la lectura registrada del hidrómetro.

$$H_1 = N + I \dots\dots\dots (2-4)$$

Donde:

H_1 = Distancia de la parte superior del bulbo a la marca de graduación registrada (cm).

N = Distancia de la parte superior del bulbo a la marca de graduación inferior del vástago (cm).

I = Distancia de la marca inferior del vástago a la marca de graduación del hidrómetro (cm).

A los valores de H_1 se les debe hacer una corrección debido al desalojo de agua, que es producto de la inmersión del hidrómetro. La zona de la suspensión situada a nivel del centro del volumen, es la que determina la lectura del hidrómetro, está más próxima a la superficie antes de sumergir el hidrómetro que después de sumergido. (CNA, 1990).

La distancia correcta, para una lectura RH en la escala del hidrómetro, se realiza con la ecuación (2-5).

$$H = H_1 + \frac{1}{2} \left(h - \frac{VH}{A} \right) \dots\dots\dots (2-5)$$

Donde:

h = Altura del bulbo (cm).

VH = Volumen del bulbo del hidrómetro (cm^3).

A = Área de la sección transversal hueca de la probeta (cm^2).

H = Distancia verdadera para una lectura correspondientes a cada marca de calibración en el vástago, RH , (cm).

La ecuación anterior se obtiene del siguiente esquema *Figura 2.6*.

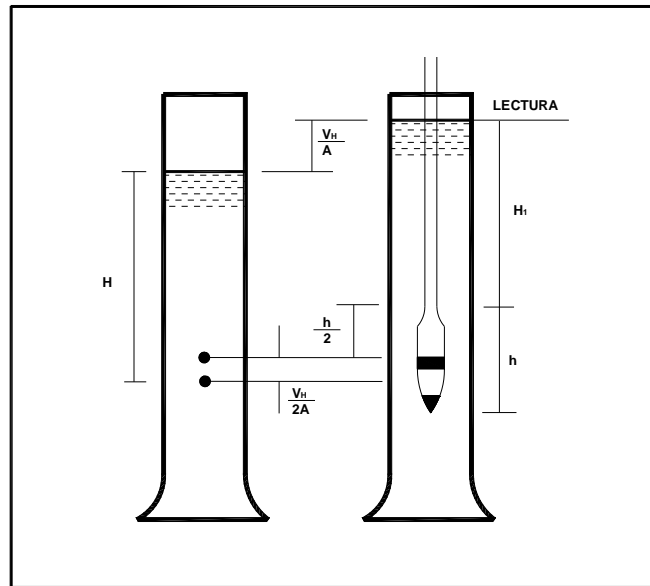


Figura 2.6 Esquema de las lecturas del hidrómetro.

Con los valores obtenidos se construye una gráfica de calibración del hidrómetro que tenga por abscisas las lecturas tomadas directamente del hidrómetro y por ordenadas los valores o lecturas que debería dar la escala del hidrómetro *Figura 2.7* (CNA, 1990).

Curva de calibración del hidrómetro.

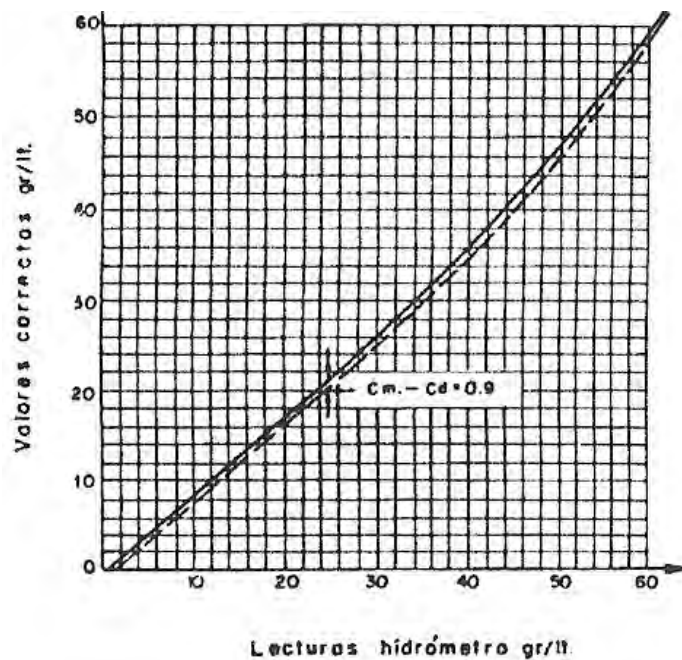


Figura 2.7 Gráfica de calibración del hidrómetro (CNA, 1990).

Para pasar de g/lit a pesos volumétricos se construye la gráfica *Figura 2.8*. En el eje de las ordenadas los valores de γ_m y en las abscisas las lecturas del hidrómetro. Así mismo construir la gráfica alturas de caída-lecturas del hidrómetro, en el eje de las abscisas las lecturas RH del hidrómetro y en la eje de las ordenadas las alturas de caída corregidas H. *Figura 2.9*.

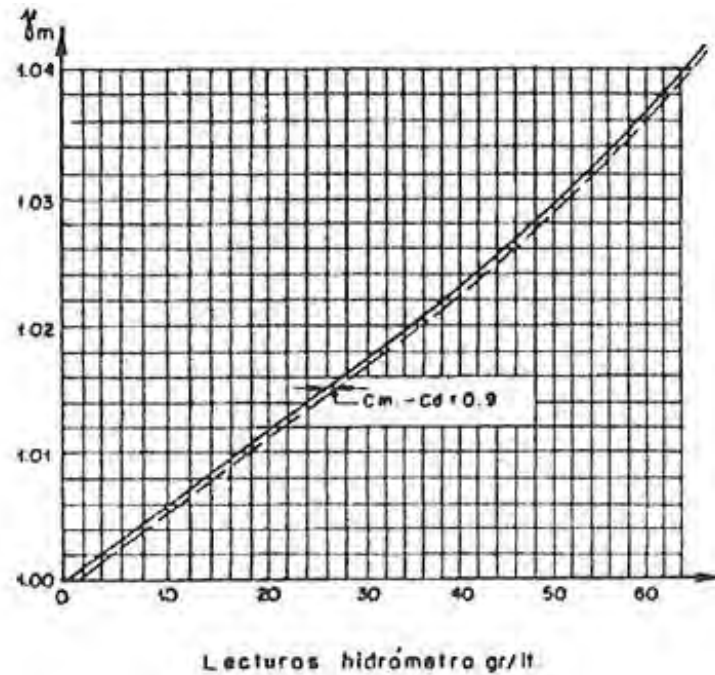


Figura 2.8 Gráfica de lecturas del hidrómetro y pesos volumétricos (CNA, 1990).

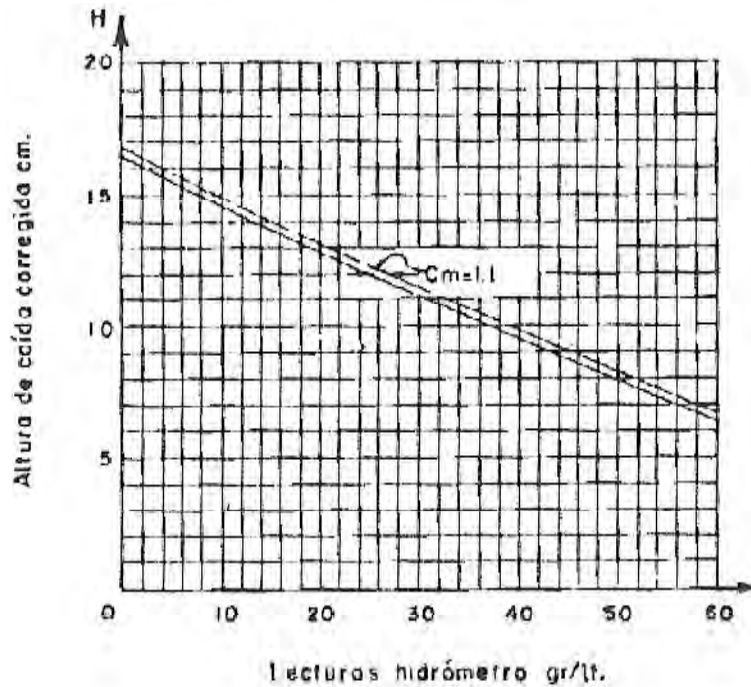


Figura 2.9 Gráfica alturas de caída-lecturas del hidrómetro (CNA, 1990).

Corrección por menisco.

El hidrómetro está calibrado para hacer la lectura al nivel libre del líquido. Al formarse el menisco alrededor del vástago, no puede tomarse la lectura correcta ya que las suspensiones de suelo no son transparentes por lo que es necesario leer donde termina el menisco y corregir la lectura sumando la lectura a él.

La corrección se determina mediante la inmersión del hidrómetro en agua destilada y tomar 2 lecturas en la escala. Una en la parte superior del menisco y otra que siga la superficie horizontal del agua, *Figura 2.10*. La diferencia de ambas lecturas da la corrección (cm). Esta debe ser sumada a las lecturas realizadas durante la operación (CNA, 1990).

La corrección se determina mediante la ecuación (2-6).

$$R'H = H + Cm \dots\dots\dots (2-6)$$

Donde:

HR= Lectura correcta del hidrómetro (cm).

Cm= Corrección por menisco (cm).

R'H= Lectura del hidrómetro a un tiempo t, más la corrección por menisco (cm).

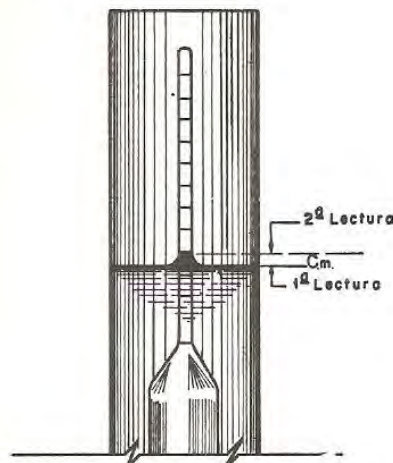


Figura 2.10 Lecturas para la corrección por menisco (CNA, 1990).

Corrección por defloculante.

Al agregar un agente dispersante a la suspensión se incrementa la densidad de la misma, por lo que se realiza una nueva corrección (C_d) que depende de la cantidad de defloculante.

Para determinar el valor de C_d se debe sumergir el hidrómetro en agua destilada y tomar la lectura en la escala. Posteriormente añadir la cantidad de defloculante a emplear en la prueba. Sumergir nuevamente el hidrómetro y tomar la nueva lectura. La diferencia de ambas lecturas es C_d , esta corrección es negativa *Figura 2.11*

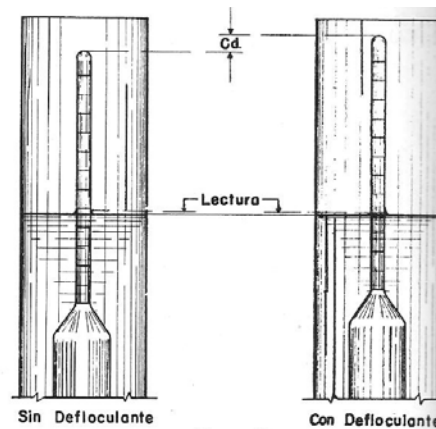


Figura 2.11 Lecturas para la corrección por defloculante (CNA, 1990).

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 3

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“CALIBRACIÓN DEL HIDRÓMETRO.”

Práctica No.3.

Calibración del Hidrómetro.

Objetivo: Determinar la altura de caída (H) de partículas de suelo menores al tamiz No. 200 en función de las lecturas realizadas en el hidrómetro.

Herramienta y Equipo.

- Hidrómetro graduado, calibrado a una temperatura de 20°C.
- Cilindro de sedimentación o probeta de 1000 cm^3 .
- Probeta de 500 cm^3 .
- 3 Matraz de 500 cm^3 calibrados.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Vernier.
- Termómetro con un rango de 0 a 50°C y aproximación de 0.1°C.
- Compás de puntas.
- Regla de acero de 30 cm.

Material.

- Agua destilada.
- Sal.
- Defloculante.

Procedimiento.

1.- Realizar la comprobación de la escala del hidrómetro.

2.-Determinar el volumen del bulbo del hidrómetro VH por cualquiera de los siguientes procedimientos mostrados.

- a) Utilizar una probeta de 1000 cm^3 llena con agua destilada hasta un cierto nivel, sumergir el hidrómetro en el interior de la probeta y medir el nuevo nivel del agua desplazada, la diferencia de ambas lecturas da como resultado el volumen del bulbo.
- b) Colocar el hidrómetro en la báscula o balanza y determinar el peso del mismo. Se considera que el peso específico del hidrómetro es unitario por consiguiente el peso en gramos es directamente el volumen en cm^3 . En ambos casos se desprecia el efecto del vástago (Juárez, 1982).

3.-Determinar el área (A) del cilindro de sedimentación o probeta de 100 cm^3 con respecto a el diámetro interior. Posteriormente medir la distancia entre 2 graduaciones (entre 500 cm^3 y 1000 cm^3) con ayuda del compás de puntas y la regla de acero, *Figura 2.12*. El área (A) es el cociente que resulta de dividir el volumen indicado entre las graduaciones, entre la distancia medida.

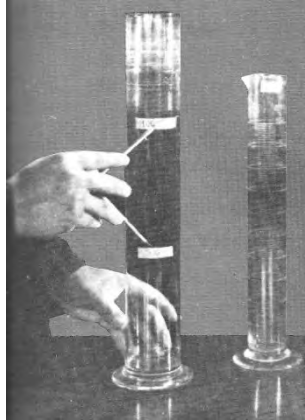


Figura 2.12 Medición de la distancia entre 2 graduaciones (CNA, 1990).

4.- Realizar las mediciones de las distancias a partir de la marca de calibración inferior del vástago a sus graduaciones del hidrómetro RH, ésto para conocer las distancias del centro del volumen a cualquier otra lectura. *Figura 2.13 y 2.14*

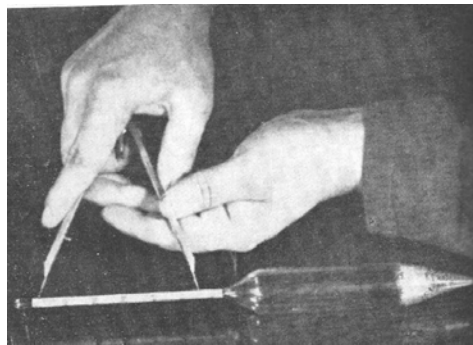


Figura 2.13 Medición de las distancias a partir de la marca de calibración inferior (CNA, 1990).

5.- Determinar la distancia N del extremo superior del bulbo a la marca de calibración del vástago, *Figura 2.14*.

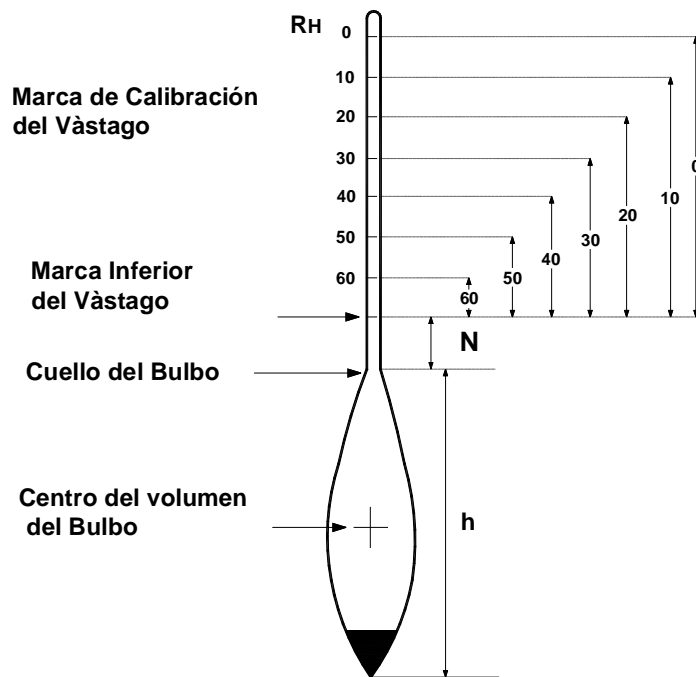


Figura 2.14 Dedición de lecturas para la calibración del hidrómetro (Bardet, 1997).

6.- Las distancia H_1 , que corresponde a una lectura RH , es la suma de las lecturas realizadas en los pasos 4 y 5. Determinar H_1 con la ecuación (2-4).

7.- Determinar la distancia desde el extremo inferior al superior del bulbo y registrarla como h , altura del bulbo *Figura 2.14*

8.- Con ayuda de la ecuación (2-5) determinar la distancia H .

9.- Realizar la gráfica de la curva de calibración del hidrómetro. En el eje de las ordenadas la distancia corregida H en centímetros y en el eje de las abscisas colocar las lecturas de las marcas de graduación del hidrómetro, *Figura 2.7*.

10.- Realizar la corrección por menisco y defloculante.

11.- Realizar las gráficas de las lecturas del hidrómetro y pesos volumétricos, así mismo construir la de alturas de caída-lecturas del hidrómetro *Figura 2.8 y 2.9*.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

2.3. CALIBRACIÓN DEL CONSOLIDÓMETRO (ASTM D2435-96).

Objetivo: Determinar la deformación del brazo de palanca del consolidómetro.

La medición de las deformaciones verticales debe ser corregida por la flexibilidad del aparato cuando excede del 5% de la deformación medida en la calibración y en todos los ensayos donde se utilice papel de filtro.

Equipo

Dispositivos de carga – Dispositivo adecuado para aplicar cargas verticales a la muestra. Este deberá ser capaz de mantener las cargas especificadas durante períodos prolongados con una precisión de ± 0.5 % de la carga aplicada y deberá permitir la aplicación de un incremento de carga, dentro de un período de 2 segundos sin que se produzca ningún efecto de importancia.

Consolidómetro – Dispositivo para mantener la muestra dentro de un anillo el cual puede estar fijo a la base o puede ser flotante (sostenido por fricción sobre la periferia de la muestra) con piedras porosas sobre cada cara de la muestra. El consolidómetro deberá proporcionar también medios para sumergir la muestra, aplicar la carga vertical, y medir el cambio de espesor de la misma. El anillo del consolidómetro deberá cumplir con los siguientes requisitos:

Diámetro mínimo de 50 mm (2.00") y al menos 5 mm (1/4") menor que el diámetro interior del tubo de muestreo si las muestras son sacadas por extrusión y desbastadas.

El espesor mínimo de la muestra deberá ser de 13 mm (0.5") pero deberá ser menor de 10 veces el diámetro de la partícula de mayor tamaño. La relación mínima del diámetro con respecto al espesor de la muestra deberá ser 2.5.

La rigidez del anillo deberá ser tal que, bajo las condiciones de la presión hidrostática de la muestra, el cambio del diámetro del anillo no pase del 0.3 % bajo la mayor carga que se aplique.

Deformímetro – Se deberá medir el cambio de espesor de la muestra con una sensibilidad de 0.0025 mm (0.0001").

Piedras porosas – Las piedras porosas podrán ser de carburo de sílice, de óxido de aluminio o de un metal que no sea atacado ni por el suelo, ni por la humedad del mismo. La constitución de su porosidad deberá ser lo suficientemente fina para evitar la intrusión del suelo dentro de sus poros. Si fuera necesario, podrá usarse papel de filtro para evitarlo. Sin embargo la permeabilidad de éstas y del papel de filtro, cuando se use, deberá ser suficientemente alta (al menos un orden de magnitud) para evitar retardo en el drenaje de la muestra. Las piedras deberán estar limpias y libres de grietas, astillas e irregularidades.

El diámetro de la piedra superior podrá ser entre 0.2 y 0.5 mm (0.01 a 0.02") menor que el diámetro interior del anillo. Cuando se emplee un anillo flotante, la piedra inferior deberá tener el mismo diámetro que la piedra superior.

El espesor de la piedra deberá ser suficiente para evitar su rotura. La piedra superior deberá cargarse a través de una placa resistente a la corrosión y deberá ser suficientemente rígida para evitar el rompimiento de la piedra.

Procedimiento

- 1.- Armar el consolidómetro con un disco de cobre o de acero duro, aproximadamente de la misma altura que la muestra de ensayo y de 1 mm (0.04") menor que el diámetro del anillo del consolidómetro.
- 2.-Humedecer las piedras porosas y el papel filtro, dejar tiempo suficiente para permitir que la humedad salga de ellos durante el proceso de calibración.
- 3.-Cargar y descargar el consolidómetro como si se tratara del ensayo y medir la deformación para cada carga aplicada.
- 4.-Dibujar la gráfica carga-deformación y aplicar las correcciones a la muestra de ensayo para cada carga aplicada.

2.4. CALIBRACIÓN DE UNA BÁLANZA ELECTRÓNICA.

Objetivo: Realizar la calibración de una balanza electrónica.

La lectura de la balanza electrónica realiza la medición de la masa haciendo uso de la gravedad. El valor de la aceleración de la gravedad varía de acuerdo a la región geográfica y altitud.

Se tiene en cuenta que el peso es la fuerza que el campo gravitacional ejerce sobre la masa de un cuerpo, siendo tal fuerza el producto de la masa por la aceleración local de la gravedad. Por lo tanto, para obtener una medición exacta, la escala debe ser adaptada al entorno local.

Ocasionalmente puede suceder que la balanza no efectúe las mediciones correctamente y necesite ser calibrada. Esta situación también puede ser producida por algún golpe o la manipulación incorrecta del aparato.

Para efectuar la calibración siga los pasos siguientes:

- 1.- Colocar la balanza en una superficie plana y posteriormente nivelarla. No debe tener ningún objeto o recipiente sobre su base.
- 2.- Encender la balanza, oprimir el botón **CAL** aparecerá una cadena de guiones en la pantalla como se muestra en la figura 2.15.

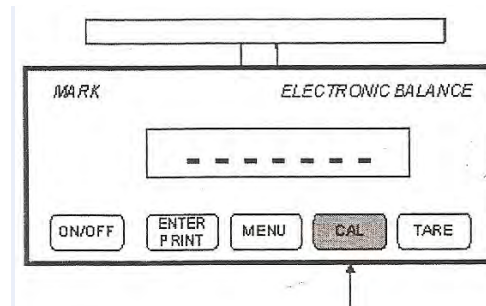


Figura 2.15 Balanza electrónica "Oprimir el botón CAL" (Controls).

- 3.- Transcurridos unos segundos la pantalla comenzará a parpadear y mostrará el valor en peso de calibración (200 gr), figura 2.16.

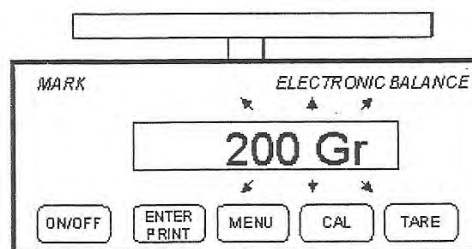


Figura 2.16 Balanza electrónica "Valor de calibración" (Controls).

4.- Colocar la pesa sobre el platillo cuyo peso exacto sea el valor marcado en la pantalla. La pantalla dejará de parpadear, e indicará el valor de calibración de la pesa. Esperar hasta que se tenga el zumbido (**BEEP**).

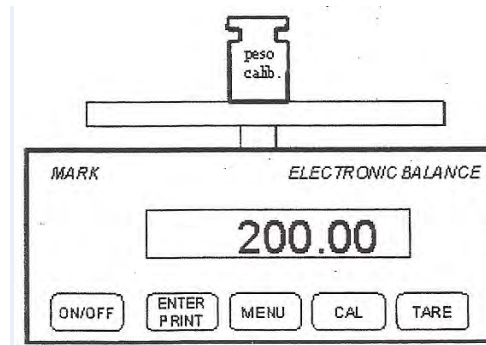


Figura 2.17 Balanza electrónica "Colocación del peso de calibración" (Controls).

5.- Retirar la pesa del platillo y la balanza electrónica esta lista para su operación.

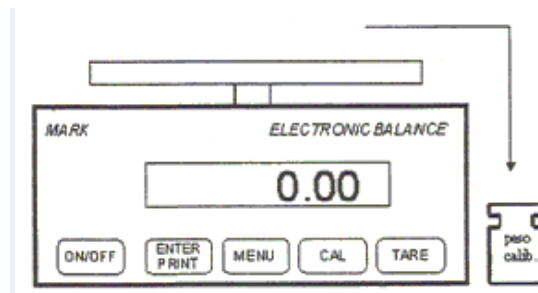


Figura 2.18 Balanza electrónica "Retiro del peso de calibración" (Controls).

Si hay una interferencia durante el proceso de calibración, el mensaje de **ERROR** se mostrará en la pantalla.

CAPÍTULO 3. PRUEBAS DEL LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS.

Objetivo: Realizar las pruebas del laboratorio de Comportamiento de los Suelos, por medio de las cuales se conocen las propiedades índice del suelo en estudio. Se facilita el procedimiento de las prácticas así como su hoja de reporte.

3.1. CONTENIDO DE AGUA (ASTM D 2216-98).

Objetivo: Se describe el método de ensayo en el laboratorio para determinar el porcentaje de agua que contiene una muestra de suelo (contenido de agua) por el uso del horno de convección y el de microondas.

3.1.1 Contenido de agua por medio del horno de convección (HC) (ASTM D 2216-98).

Introducción.

El contenido de agua de un material se define como la relación de la masa del agua de los poros, o agua libre, de una masa dada de material respecto a la masa de los sólidos que lo constituyen.

Una muestra de material se seca en un horno hasta que alcance una masa constante, esto quiere decir que perderá peso debido a la pérdida de agua durante su secado. El contenido de agua se calcula como la relación entre la masa de agua y la masa de la muestra seca.

Terminología.

Contenido de Agua (de un material): Es la relación de la masa de agua contenida en los poros del suelo, con respecto a las partículas de la masa sólida que constituyen a ese material, y se expresa en porcentaje.

Uso y significado.

Para muchos materiales este contenido de agua es una de las propiedades índice más significativas. Éste se usa para calcular las relaciones de fases de aire, agua y sólidos en un volumen dado de material.

El contenido de agua se determina por medio del peso de una muestra representativa de suelo en estado húmedo, posteriormente se introduce en el horno con una temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta su secado y se determina su peso. La diferencia de pesos de la muestra de suelo, antes y después de secada al horno, representa el peso del agua que contenía la muestra. El peso del agua expresado como porcentaje del peso seco de la muestra proporciona el contenido de agua. Éste puede variar desde cero cuando la muestra está completamente seca, hasta un máximo determinado y variable cuando está completamente saturada (Crespo, 2004).

Secado en horno de Convección (HC)

La técnica estandarizada por ASTM D2216 es base para definir el peso seco del material. Para el secado de la muestra de suelo, es necesario que esta permanezca en el horno de convección, mismo que deberá mantener una temperatura de $110\pm 5^\circ\text{C}$. El tiempo requerido para lograr el secado de la muestra varía dependiendo el tipo de material, tamaño de la muestra y de otros factores, pero se especifica por lo menos 16 horas.

Cálculos.

Para determinar el contenido de agua se tiene la ecuación (3-1).

$$\omega(\%) = \left[\frac{(Wr+Sh) - (Wr+Ss)}{(Wr+Ss) - Wr} \right] \times 100 = \frac{Ww}{Ws} \times 100 \dots\dots\dots (3-1)$$

ω =contenido de agua (%).

Ww =Peso del agua ($Wr+Sh - Wr+Ss$) (gr).

Ws =Peso del suelo seco ($Wr+Ss - Wr$) (gr).

$Wr+Sh$ =Peso de la tara más Suelo húmedo (gr.)

$Wr+Ss$ =Peso de la tara más Suelo seco (gr.)

Wr =Peso de la tara (gr.)

Calcular la media de las tres determinaciones y registrar como el contenido de agua del espécimen.

Tabla 3.1 Cantidad de masa de suelo según su tipo, para W(%) (Bardet, 1997).

Tipo de Suelo	Masa
Suelos finos	30 g
Suelo de grano medio	300 g
Suelo de grano grueso	3 kg

3.1.2 Contenido de agua por medio del horno de microondas (HMO) (ASTM D 4643-00).

Introducción.

Se sugiere el secado del suelo por medio del horno de microondas para la determinación del contenido de agua como un procedimiento más rápido, más barato y tan confiable como el tradicional que usa el horno de convección.

La determinación experimental más sencilla que se realiza en mecánica de suelos es la del contenido de agua; es la primera propiedad índice que se obtiene en cualquier estudio geotécnico y junto con sus límites de consistencia, proporciona información muy relevante acerca de las propiedades ingenieriles de los suelos.

Tabla 3.2 Cantidad de masa de suelo según el tamiz, para W(%) (ASTM D4643-00).

Tamiz	Masa Recomendada (g)
No. 10 (2mm)	100 a 200
No. 4 (4.75mm)	300 a 500
No. 3/4" (19mm)	500 a 1000

Secado en horno de Microondas (HMO).

Calentamiento por microondas

Algunas sustancias como el agua presentan moléculas polares o dipolos, en estas el centro de las cargas positivas no coinciden con el centro de las cargas negativas.

El calentamiento del horno de microondas se debe al continuo movimiento molecular, provocado por la acción del un campo eléctrico (polarización) alternamente. Si el campo eléctrico cambia constantemente su polaridad, los dipolos cambian de posición intentando acompañar las modificaciones del campo y en consecuencia producen calor por fricción. Cuanto mayor es la capacidad de los materiales a cambiar su polaridad, mayor es su constante eléctrica.

El agua favorablemente tiene una constante dieléctrica relativamente alta en comparación a otras moléculas, y por la generación del campo eléctrico externo, el agua se calentará mucho más rápido que otros cuerpos que tengan dieléctrica menor.

El agua tiene una constante dieléctrica relativa entre 88(a 0°C) y 55.3 (a 100°C) valores altos en comparación con la de los materiales que forman la fase sólida del suelo, que es menor de cuatro. En el caso de un material arcilloso su constante dieléctrica para temperaturas mayores a 100°C es menor a 10. Al secar los suelos en un horno de microondas como los que comúnmente se utilizan en la cocina, el agua se calienta más rápido que su fase sólida.

Se presentan determinaciones hechas sobre diferentes suelos húmedos secados en el horno de microondas con energía máxima y continua. En donde el agua correspondiente a cada suelo se calienta rápidamente y alcanza su punto de ebullición manteniéndose hasta que ésta se evapora.

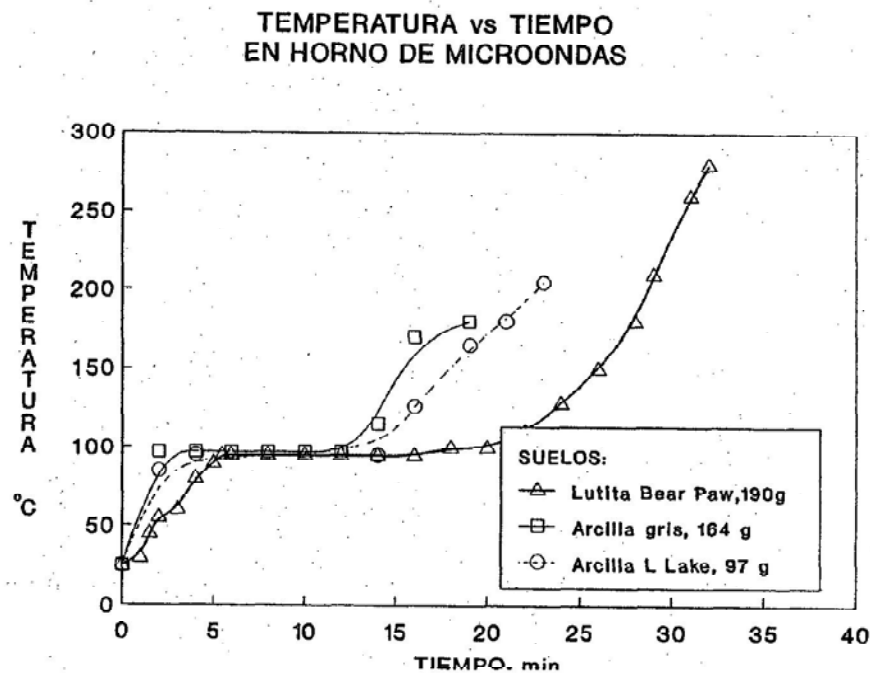


Figura 3.1 Variación de la temperatura con el tiempo de diversos suelos con el HMO (Mendoza, 1997).

En la figura 3.1 se aprecia que transcurrido un cierto tiempo, en función del tipo de suelo y la cantidad de agua que contenga, la temperatura puede alcanzar hasta tres veces la de ebullición del agua, provocando así, que se remueva no sólo agua libre.

De manera práctica el secado de un suelo, consiste en colocarlo en un recipiente de tipo transmisor e introducirlo en el horno de microondas, para ser secado en intervalos de tiempo, de tal forma que pierda agua; al finalizar cada intervalo, la muestra debe pesarse y observar el cambio del peso, repetir el mismo procedimiento hasta que su peso sea constante.

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 4

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“CONTENIDO DE AGUA (HC Y HMO).”

Práctica No.4

Contenido de Agua por HC.

Objetivo: Determinar el porcentaje de agua que contiene una muestra de suelo.

Herramienta y Equipo.

- Horno de convección a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balanza de aproximación de 0.01g para muestras de 100g.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Cápsulas de porcelana.
- Guantes.
- Cuchillo de bolsillo o una espátula pequeña de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho con punta redonda

Material.

- Muestra de suelo (*Tabla 3.1*).

Procedimiento.

1.- Determinar el peso de las cápsulas de porcelana previamente limpias. Posteriormente marcar los recipientes para prevenir confusiones. Registrar el peso de las cápsulas W_r , *Figura 3.2*.

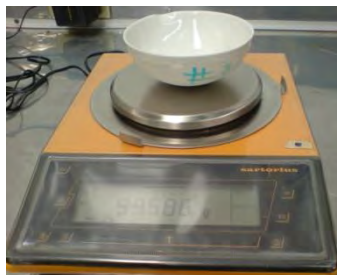


Figura 3.2 Peso de la cápsula.

2.- Seleccionar las muestras de suelo para el ensayo.

3.- Colocar la porción del espécimen dentro de la cápsula de porcelana. *Figura 3.3*.



Figura 3.3 Cápsula de porcelana con suelo.

4.- Determinar el peso de la de la cápsula con el espécimen y registrarlo W_r+Sh , *Figura 3.4*.



Figura 3.4 Peso de la cápsula con suelo.

5.- Colocar las muestras en el horno eléctrico con un rango de temperatura de entre $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Nota: se debe mantener esa temperatura para evitar la calcinación de la muestra de suelo. El orden del tiempo de secado depende de varios factores por ejemplo del tipo de material, del tamaño de la muestra, etc. El rango establecido es del orden de 12 a 16 horas.

6.- Retirar la muestra del horno y dejar enfriar a temperatura ambiente hasta que se tenga un manejo adecuado con las manos desnudas.

7.- Determinar el peso nuevamente de la cápsula y el espécimen seco y registrar el dato obtenido W_r+S_s .

8.- Calcular el contenido de agua de la muestra ω (%).

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

Contenido de Agua (HMO).

Objetivo: Determinar el porcentaje de agua que contiene una muestra de suelo. Esta prueba es muy sencilla y rápida en su realización, ya que se emplea un horno de microondas.

Herramienta y Equipo.

- Horno de Microondas tipo casero con un potencia de 700 a 800 Watts.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Cápsulas de porcelana.
- Cuchillo de bolsillo o una espátula pequeña de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho con punta redonda.

Material.

- Muestra de suelo (*Tabla 3.2*)

Procedimiento.

- 1.- Determinar el peso de la cápsula de porcelana previamente limpia. Registrar el peso de las cápsulas W_r .
- 2.- Colocar la porción del espécimen dentro de la cápsula de porcelana y determinar su peso.
- 3.- Colocar la muestra en el horno de microondas por espacio de 3 minutos.
- 4.- Retirar la muestra del horno y dejar enfriar a temperatura ambiente hasta que se tenga un manejo adecuado con las manos desnudas. Mezclar cuidadosamente con una espátula el suelo, sin perder el mismo. Determinar su peso.
- 5.- Colocar nuevamente la muestra en el horno de microondas por 1 minuto.
- 6.- Repetir los pasos 4 y 5 hasta que el cambio entre dos determinaciones de peso consecutivas sea poco significativa en el cálculo del contenido de agua.
- 7.- Usar el último peso del recipiente con el suelo para determinar el contenido de agua.

3.2. GRAVEDAD ESPECÍFICA O DENSIDAD DE SÓLIDOS (ASTM D 854-98).

Introducción.

La densidad absoluta de un cuerpo es su masa contenida en una unidad de volumen, *sin incluir sus vacíos*. La densidad aparente es la masa del cuerpo contenida en una unidad de volumen, *incluyendo sus vacíos*.

La densidad relativa de un sólido es la relación de su densidad, con la densidad absoluta del agua destilada a una temperatura de 4°C. Así en un suelo la densidad relativa del mismo se define como la relación de la densidad absoluta o aparente promedio de las partículas que constituyen el suelo, a la densidad del agua destilada a 4°C, que tiene un valor de 1 gr/cm^3 .

Los materiales que contienen mayor parte de partículas gruesas se les determina la densidad relativa aparente y a los materiales que contienen en su mayoría partículas finas se les determina densidad relativa absoluta (Crespo, 2004).

Terminología.

La densidad de sólidos se define como la relación que existe entre el peso de los sólidos y el peso del volumen del agua desalojado por los mismos.

El valor de la densidad que queda expresado por un número abstracto, sirve para fines de clasificación e interviene en la mayor parte de los cálculos de Mecánica de Suelos (CNA, 1990).

Una de las aplicaciones más comunes de la densidad (Gs), es en la obtención del volumen de sólidos, cuando se calculan las relaciones gravimétricas y volumétricas de un suelo.

Uso y significado.

Generalmente la variación de la densidad de sólidos es de 2.60 a 2.80, aunque existen excepciones como en el caso de la turba en la que se han registrado valores de 1.5 y aún menores, debido a la presencia de materia orgánica. En cambio en suelos con cierta cantidad de minerales de hierro la densidad de sólidos ha llegado a 3.

3.2.1. Densidad de sólidos para suelos finos.

Para calcular la densidad se realiza el siguiente procedimiento:

Por definición se tiene:

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_o}$$

Reemplazando:

$$V_s = W_{fws} - W_{fw}$$

$$W_{fws} - W_{fw} = W_s - \frac{W_s}{G_s} \times \gamma_o$$

Donde:

γ_o = densidad del agua destilada a temperatura de 4°C; tiene el valor de 1 gr/cm³.

G_s = Peso específico relativo de los sólidos = $W_s / (V_s \gamma_o)$.

O sea que:

$$\frac{W_s}{G_s} \times \gamma_o = W_{fw} + W_s - W_{fws}$$

Por lo tanto:

$$G_s = \frac{W_s \times \gamma_o}{W_{fw} + W_s - W_{fws}}$$

Entonces tenemos la ecuación (3-2) con la que se determina la densidad de sólidos.

Considerando: $\gamma_o = 1$ gr/cm³.

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{fw} - W_{fws}} \dots \dots \dots (3-2)$$

Donde:

W_s = Peso del suelo seco (gr).

W_{fw} = Peso del matraz lleno de agua (gr).

W_{fws} = Peso del matraz lleno de agua con suelo (gr).

G_s = Densidad de sólidos.

3.2.2. Densidad de sólidos para suelos gruesos.

La densidad de sólidos de un suelo se define como el peso unitario de la parte sólida del material analizado (γ_s), dividido entre el peso unitario del agua destilada a 4°C y a nivel del mar (γ_w).

$$G_s = \gamma_s / \gamma_w = W_s / (V_s \gamma_w) \dots \dots \dots (3-3)$$

V_s = Volumen de los sólidos (cm³).

Considerando: $\gamma_w = 1$ gr/cm³.

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 5

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“ DENSIDAD DE SÓLIDOS (Gs).”

Práctica No. 5

Densidad de Sólidos.

Objetivo: Determinar la densidad de sólidos de una muestra de suelo fino y granular. Para la parte fina se emplea el matraz de fondo plano con su correspondiente curva de calibración y para la parte gruesa se hace uso de probetas.

Herramienta y Equipo.

- Matraz de 500 cm^3 calibrado.
- Parrilla eléctrica.
- Termómetro graduado de 0° a 50°C con divisiones de 0.1°C.
- Balanza con capacidad de 5 kg y aproximación de 0.5g.
- Balanza con capacidad de 1 kg y aproximación de 0.01g.
- Horno de convección a una temperatura de $110 \pm 5^\circ C$.
- Picnómetro tipo sifón. Formado por un cilindro metálico de 163 mm de diámetro y 370 mm de altura, con un sifón colocado a 250 mm de su base.
- Pisseta.
- Cuenta gotas o Pipeta, de vidrio o metal.
- Probeta graduada de 1000 cm^3 de capacidad y aproximación de 10 cm^3 .
- Cápsulas de porcelana.
- Embudo de vidrio o plástico.
- Guantes.
- Cubeta y recipiente metálico circular de 20 cm de diámetro.

Material.

- Muestra de suelo fino y grueso.
- Agua destilada
- Papel secante.

Procedimiento de densidad de sólidos para suelos finos.

1.-Tomar una muestra de suelo previamente triturada de 100 a 120 gr aproximadamente, colocándola en una cápsula de porcelana, posteriormente se introduce en el horno a una temperatura constante de 110°C durante 18 horas mínimo. Transcurrido el tiempo se retira la cápsula del horno, se deja enfriar y se toma una cantidad de 60 gr de material aproximadamente.

2.-Se toma el matraz calibrado. Se le añade agua destilada a dos terceras partes de su volumen, se vacía el material seco en el matraz lleno de agua con ayuda de un embudo para no perder material, *Figura 3.5*. Se mezcla el material girando el matraz en sentido horizontal cuidadosamente.



Figura 3.5 Vaciado del material.

3.-Se desprende el material que quedó adherido en el cuello del matraz, utilizando una piseta con agua destilada. Se llena el matraz con la piseta hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de aforo.

4.-Se coloca el matraz en la parrilla para aumentar su temperatura (40°C) con el fin de expulsar el aire contenido en el material. Con un tiempo de hervido de 10 minutos para arenas y para arcillas de 30 minutos.

Se debe girar cuidadosamente el matraz en sentido horizontal para uniformizar la temperatura y no salga la mezcla cuando está hirviendo.

5.-Se retira el matraz de la parrilla, se le agrega agua destilada hasta que la parte inferior del menisco coincida con la línea de aforo. Se limpia el exterior del mismo para eliminar grasas y se deja enfriar colocándolo dentro de una cubeta con agua fría hasta que se encuentre en el rango de temperatura de la curva de calibración del matraz, posteriormente se elimina el agua adherida en el cuello del matraz. Se determina el peso del matraz con agua y sólidos (W_{fw}).

6.-Tomar la temperatura de la muestra en tres secciones del matraz (arriba, abajo y en medio), la diferencia de temperaturas no debe ser mayor a 3°C , de lo contrario se debe agitar el matraz con el fin de homogenizar la temperatura de la muestra.

Teniendo la temperatura registrada se hace uso de la curva de calibración del matraz y se determina el W_{fw} . Posteriormente se sustituyen los datos en la ecuación (3-2).

8.- Colocar la mezcla de suelo en un recipiente, con sumo cuidado donde no se deje nada de muestra en el matraz. Someter la muestra a evaporación, con el fin de determinar el peso de los sólidos (W_s).

La prueba debe hacerse simultáneamente en dos matraces a fin de tener una comprobación. Si los valores no difieren en más de 1% promédiense, si la diferencia es mayor repítase la prueba.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

Procedimiento de densidad de sólidos para suelos gruesos.

- 1.- Tomar una muestra de suelo grueso, la cual debe ser colocada en un recipiente lleno de agua durante un tiempo de 24 horas, para alcanzar la saturación del material.
- 2.- Transcurrido el tiempo de saturación, retirar la muestra del recipiente y secarla superficialmente con trapo, basta que pierda su brillo superficial. *Figura 3.6.*



Figura 3.6 Secado superficial del la muestra (CNA1990).

- 3.- Determinar el peso de la muestra de grano grueso previamente saturada. Registrar como peso de la grava húmeda.
- 4.- Colocar un volumen de agua conocido (600 ml aproximadamente) en la probeta graduada. Posteriormente introducir el material grueso en la probeta con agua y determinar la diferencia de las dos lecturas de la probeta y registrarlo como el volumen desalojado. *Ffigura 3.7.*

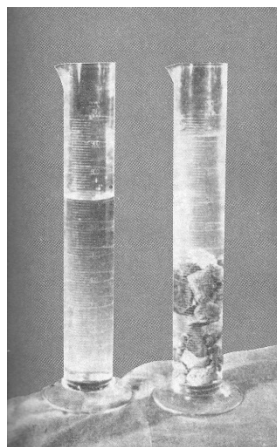


Figura 3.7 Diferencia de lecturas de las probetas (CNA1990).

También se puede realizar con el empleo de un picnómetro si lo prefiere. Llenar de agua el picnómetro hasta el nivel de enrase. Introducir las gravas en el picnómetro, midiendo el volumen de agua desalojado con ayuda de la probeta, *Figura 3.8 (Vs).*



Figura 3.8 Medición del Volumen de agua desalojado.

Retirar las gravas del picnómetro e introducirlas al horno con el fin de determinar el peso de los sólidos (W_s).

5.- Retirar cuidadosamente el agua de la probeta, procurando no perder material. Colocar el material en una cápsula de porcelana de peso conocido e introducirlo al horno aproximadamente 18 horas para su secado.

6.- Retirar la muestra del horno y determinar su peso. Registrar como peso grava seca.

7.- Calcular el valor de la densidad de sólidos con la ecuación (3-3).

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

3.3. RELACIÓN DE VACIOS Y POROSIDAD.

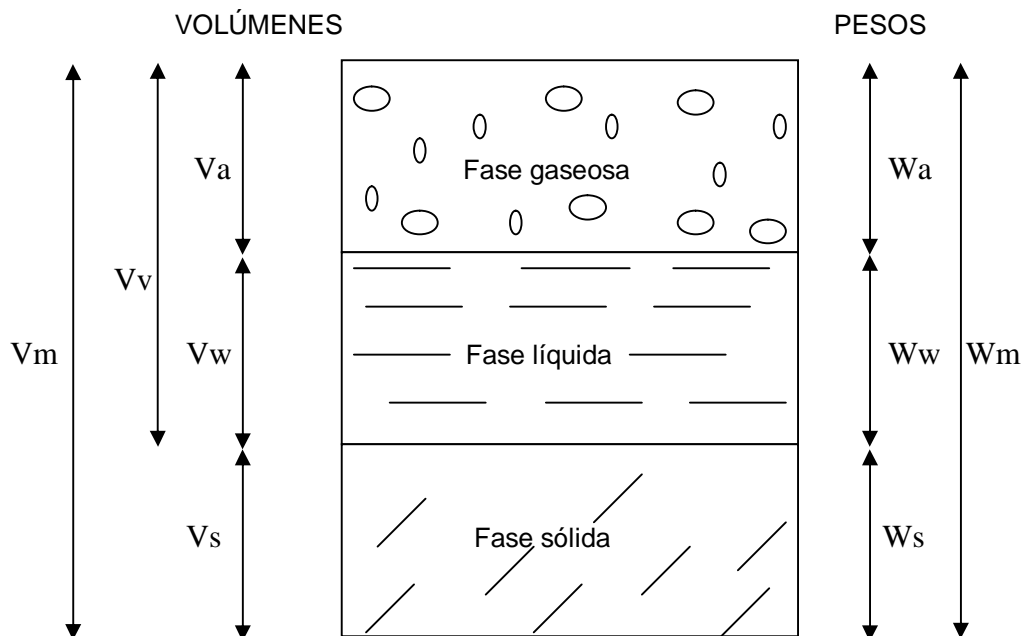
Objetivo: Determinar la relación de vacíos y porosidad de una muestra de suelo fino y granular.

Introducción.

La determinación de las relaciones volumétricas de los suelos son importantes, para el manejo de las propiedades mecánicas de los suelos y un completo dominio de su significado y sentido físico.

Cuando el suelo es un medio poroso se considera formado por tres fases. Se representan esquemáticamente por la *Figura 3.9*.

1. La fase sólida, formada por partículas minerales u orgánicas, o ambas.
2. La fase líquida, que ocupa parcial o totalmente los vacíos del suelo.
3. La fase gaseosa, que ocupa parcial o totalmente los vacíos que deja la fase líquida del suelo (Crespo, 2004).



V_m = Volumen de la muestra.
 V_v = Volumen de vacíos.
 V_s = Volumen de los sólidos.
 V_a = Volumen de los gases.
 V_w = Volumen de agua.

W_m = Peso de la muestra.
 W_a = Peso de los gases.
 W_w = Peso del agua.
 W_s = Peso de los sólidos.

Figura 3.9 Esquema representativo del suelo.

Terminología.

Relación de Vacíos: Oquedad o Índice de poros es la relación entre el volumen de los vacíos y el de los sólidos de un suelo.

Volumen de vacíos: Representa los espacios existentes entre las partículas sólidas del suelo, debido al acomodo que sufren al encontrarse como depósitos o como producto del intemperismo.

Volumen de sólidos: Es el conjunto de partículas sólidas del suelo, que constituyen estructuralmente la masa del suelo y varían en tamaño, forma y textura según su formación geológica.

Volumen de agua: Es la cantidad de agua en el suelo, cuyo volumen depende de la cantidad de vacíos del suelo.

Porosidad de un suelo: Relación entre su volumen de vacíos y el volumen de su masa. Se expresa como porcentaje (Juárez, 1982).

Grado de Saturación: Es la relación entre su volumen de agua y el volumen de sus vacíos. Varía de cero (Suelo Seco) a 100% (Suelo totalmente saturado).

Uso y significado.

Para determinar la porosidad y la relación de vacíos de un suelo sin cohesión, se debe llenar un vaso de precipitado con agua y añadir después el suelo hasta llenarlo el vaso de precipitado. El volumen de vacíos del suelo puede determinarse con la comparación de la masa total de la muestra con la masa del vaso y suelo. Para determinar el volumen de las partículas, se realiza la diferencia entre el volumen total de la muestra con el valor obtenido del volumen de vacíos. (Whitlow, 1994).

La relación de vacíos puede variar teóricamente de 0 ($V_v = 0$) a ∞ (valor correspondiente a un espacio vacío). No suelen darse valores menores de 0.25 (arenas muy compactas con finos) ni mayores de 15, en el caso de algunas arcillas altamente compresibles.

La porosidad puede variar de 0 (en un suelo ideal con sólo fase sólida) a 100 (espacio vacío). Los valores reales pueden oscilar entre 20 % y 95% (Juárez, 1982).

Cálculos.

Las ecuaciones para determinar la relación de vacíos se muestran a continuación.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \dots \dots \dots (3-4)$$

Donde:

e= Relación de vacíos.

V_v = Volumen de vacíos (cm^3).

V_s = Volumen de los sólidos.

$$V_v = V_a + V_w \dots \dots \dots (3-5)$$

V_a =Volumen de la fase gaseosa (cm^3).

V_w =Volumen de la fase líquida (cm^3).

$$V_v = V_m - V_s = W_m - (W_{vaso} + W_s) \dots \dots \dots (3-6)$$

V_m =Volumen de la muestra (cm^3).

V_s =Volumen de sólidos (cm^3).

W_m = Peso de la muestra.

Para la determinación del volumen de los sólidos cuando se conoce la gravedad específica se utiliza la ecuación (3-7).

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_o} \dots \dots \dots (3-7) \quad \gamma_o = 1 \frac{gr}{cm^3}$$

γ_o =Peso específico del agua destilada.

W_s =Peso de los sólidos (gr).

G_s =Gravedad específica (adimensional).

Si no se conoce el G_s se determina mediante la resta del volumen del vaso de precipitado (V_m) con el volumen de vacíos (V_v) calculado con la ecuación (3-8).

La ecuación para determinar la porosidad se muestra a continuación.

$$n = \frac{V_v}{V_m} \times 100 \dots \dots \dots (3-8)$$

Donde:

n =Porosidad (%).

Si se conoce el valor de cualquiera de los dos (e o n) se puede determinar uno mediante el otro con las ecuaciones (3-9) y (3-10).

$$n = \frac{e}{1+e} \dots \dots \dots (3-9)$$

$$e = \left(\frac{n}{1-n} \right) \dots \dots \dots (3-10)$$

La ecuación para determinar el peso específico de la masa de suelo se muestra a continuación.

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \dots\dots\dots(3-11)$$

Donde:

W_w =Peso de la fase líquida (gr).

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 6

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“RELACIÓN DE VACIOS Y POROSIDAD.”

Práctica No. 6

Relación de Vacíos y Porosidad.

Objetivo: Determinar la relación de vacíos y la porosidad de una muestra de suelo en el laboratorio.

Herramienta y Equipo.

- Vaso de precipitado de 1000 mL.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Balanza de 5 kg de capacidad y aproximación de 0.05 grs.
- Probeta graduada de 1000 cm^3 de capacidad y aproximación de 10 cm^3 .
- Cuchillo de bolsillo o una espátula pequeña de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho con punta redonda.

Material.

- Agua.
- Toalla.
- Muestra de suelo.

Procedimiento.

1.- Colocar el vaso de precipitado en la báscula y determinar su peso (W vaso), *Figura 3.10*.



Figura 3.10 Peso del vaso de precipitado.

2.-Determinar el volumen del vaso de precipitado empleando agua, utilizando la probeta graduada. Colocar un volumen de agua conocido en la probeta para introducirlo al vaso y así sucesivamente hasta que el vaso se muestre lleno, *Figura 3.11* .Posteriormente determinar su volumen sumando los volúmenes de agua introducidos al vaso, (V_m).



Figura 3.11 Vaso lleno de agua.

3.-Retirar el agua del vaso y limpiarlo perfectamente. Tomar una muestra de suelo e introducirla en el vaso hasta llenarlo, con ayuda de la espátula enrasar la superficie (Figura 3.12a) y determinar su peso ($W_{\text{vaso}} + W_s$) (Figura 3.12b). Determinar el peso del suelo (W_s).



a) Vaso con muestra de suelo.



b) Peso del vaso con suelo.

Figura 3.12 Colocación del material granular en el Vaso de precipitado.

4.-Agregar agua al vaso de precipitado con suelo (Figura 3.13a). Determinar el peso del vaso de precipitado con agua y suelo, (W_m). (Figura 3.13b).



a) Vaso lleno de agua con muestra de suelo.



b) Peso del vaso lleno de agua con suelo.

Figura 3.13 Llenado del vaso de precipitado

5.- Calcular el volumen de vacíos y volumen del suelo. Utilizar $V_v = W_w$ entonces se tiene:

$$V_v = W_m - (W_{\text{vaso}} + W_s) ; \quad V_s = V_m - V_v$$

6.-Calcular la relación de vacíos, la porosidad del suelo con las ecuaciones (3-4), (3-8).

7.- Calcular el peso específico de la masa de suelo con la ecuación (3-11).

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

3.4. PESOS VOLUMÉTRICOS.

Introducción.

El peso específico seco es un valor particular del peso específico de la muestra y se determina cuando el grado de saturación del suelo es nulo, esto es que la muestra no contiene agua.

Para los suelos que se encuentran bajo el nivel freático se debe poner atención al cálculo de sus pesos específicos ya que el empuje hidrostático ejerce influencia en los mismos. En la mayoría de los casos los suelos sumergidos se consideran como saturados dada su posición bajo el nivel freático (Juárez, 1982).

Terminología.

Peso volumétrico de la muestra (γ_m): Es la relación del peso total de la muestra entre el volumen de la misma.

Peso específico del agua (γ_w): En condiciones reales de trabajo, su valor difiere muy poco del peso específico del agua destilada y en varias situaciones prácticas sus valores se consideran iguales (Juárez, 1982).

Peso específico seco (γ_d): Es el cociente del peso de sólidos al volumen total del espécimen al momento en que el peso seco se define. El peso específico seco se define para especímenes húmedos, en cuyo caso el volumen utilizado es el volumen del espécimen húmedo, no el espécimen después del secado.

Peso específico sumergido (γ'_m): Es el peso específico de suelo inmerso en agua.

Uso y significado.

Los pesos específicos sumergidos se utilizan en problemas de ingeniería para determinar los esfuerzos efectivos. Los suelos sumergidos a menudo están saturados, pero no siempre.

3.4.1. Peso volumétrico del suelo por el método de plastipack.

La ecuación (3-12) determina el peso específico seco de la muestra de suelo.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_m} \dots \dots \dots (3-12)$$

Donde:

γ_d = Peso específico seco (gr./cm³).

W_s =Peso de los sólidos (gr).

V_m =Volumen de la muestra (cm³).

Para determinar el diámetro promedio de la muestra se tiene la ecuación (3-13).

$$D_{prom.} = \frac{D_s + 4D_m + D_i}{6} \dots \dots \dots (3-13)$$

D_s =Diámetro superior (cm).

D_m =Diámetro medio (cm).

D_i =Diámetro inferior (cm).

D_{prom} =Diámetro geométrico promedio (cm).

Para el peso específico sumergido se utiliza la ecuación (3-14).

$$\gamma' m = \gamma m - \gamma w \dots \dots \dots (3-14)$$

3.4.2. Peso volumétrico del suelo por el método de la cera.

Para conocer el peso específico del material, primero se requiere determinar el peso unitario de la cera. La cera es más ligera que el agua, quiere decir que no se hunde en el agua y necesita ser balastado (empujado). Como se muestra en la *Figura 3.14*.

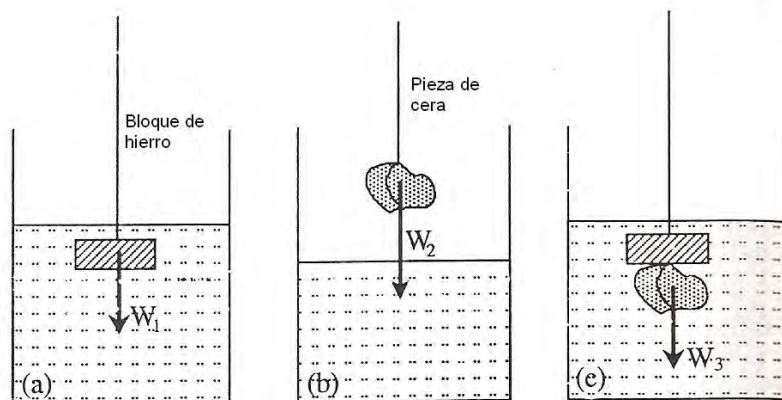


Figura 3.14 Determinación del peso específico unitario de la cera (Bardet, 1997).

El peso sumergido W_1 de un bloque de metal es bastante pesado para hundir el pedazo de cera en el agua.

Peso W_2 es del pedazo de cera solo.

Peso de la unidad flotante total W_3 de metal y de la cera.

El peso específico de la cera es:

$$\gamma_p = \gamma_w \frac{W_2}{W_1 + W_2 - W_3} \dots \dots \dots (3-15)$$

Ecuación para determinar el contenido de agua.

$$\omega(\%) = \left[\frac{(W_r + S_h - W_r + S_s)}{(W_r + S_s - W_r)} \right] \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \dots \dots \dots (3-16)$$

Donde:

$W_r + S_h$ = Peso de la muestra húmeda de suelo más la tara.

$W_r + S_s$ = Peso de la muestra seca más la tara.

W_r = Peso de la tara.

Ecuación para determinar el peso específico seco.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + W} \dots \dots \dots (3-17)$$

Ecuación para determinar el peso específico de la muestra.

$$\gamma_m = \gamma_w \frac{W}{W_p - W_l - \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_p}\right)(W_p - W)} \dots \dots \dots (3-18)$$

Donde:

W = Peso de la muestra.

W_p = Peso de la muestra encerada.

W_l = Peso de inmersión de la muestra de suelo encerada.

γ_w = Peso específico del agua.

γ_p = Peso específico de la cera.

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 7

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“PESOS VOLUMÉTRICOS.”

Práctica No. 7

Pesos Volumétricos.

Objetivo: Determinar los pesos específicos seco y sumergido de una muestra de suelo por medio del plastipack y cera.

Herramienta y Equipo.

- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Balanza de 5 kg de capacidad y aproximación de 0.05 grs.
- Cápsula de porcelana.
- Recipiente (cubeta) y charola (para derretir la parafina).
- Horno de secado a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Guantes.
- Vernier.

Material.

- Agua.
- Film de polímero estirable.
- Parafina.
- Hilo de pescar.
- Muestra de suelo.

Procedimiento del peso volumétrico por medio de plastipack.

1.- Tomar una muestra de suelo previamente labrada en una forma geométrica conocida (cilindro o cubo) *Figura 3.15*.



Figura 3.15 Muestra de forma cilíndrica.

2.- Determinar el diámetro promedio de la muestra. Medir el diámetro superior, medio e inferior (*Figura 3.16*) y sustituir los datos en la ecuación (3-13).



Figura 3.16 Medición del diámetro geométrico de la muestra.

- 3.- Determinar la altura de la muestra a cada 120° y determinar su altura promedio. Posteriormente calcular su volumen.
- 4.- Cubrir la muestra de suelo con plastipack (*Figura 3.17*).



Figura 3.17 Muestra de suelo cubierta con plastipack.

- 5.- Colocar el hilo de pescar en los extremos de la muestra de suelo cubierta con plastipack (*Figura 3.18*).



Figura 3.18 Muestra de suelo cubierta con plastipack y atada en sus extremos con hilo de pescar.

- 6.- Colocar la muestra en la báscula registrar su peso.
- 7.- Sumergir la muestra en una cubeta llena de agua y registrar su peso sumergido, *Figura 3.19*.



Figura 3.19 Determinación del peso específico sumergido.

Procedimiento de forma analítica como comprobación.

- 1.- Determinar el peso de la cápsula y colocar la muestra dentro de la misma, pesar la muestra con la cápsula. Determinar el W_m . Posteriormente introducir en el horno a una temperatura constante de 110°C durante 18 horas mínimo.
- 2.- Retirar la cápsula con la muestra de suelo del horno y pesar nuevamente. Determinar el W_s .
- 3.- Con el volumen de la muestra conocido y con ayuda de las ecuaciones (3-12) y (3-14) calcular el peso específico seco y el peso específico sumergido de la muestra de suelo.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

Procedimiento del peso volumétrico por medio de cera.

Cuando la muestra de suelo tiene una forma irregular y se requiere conocer el peso específico sumergido se emplea el siguiente procedimiento.

- 1.- Tomar una muestra de suelo en buen estado con una forma voluminosa conveniente de aproximadamente 5 cm de tamaño. Evitar que la muestra tenga esquinas afiladas o agujeros.
- 2.- Atar el espécimen a 50 centímetro de hilo pescar y pese el espécimen como muestra la *Figura 3.20*.

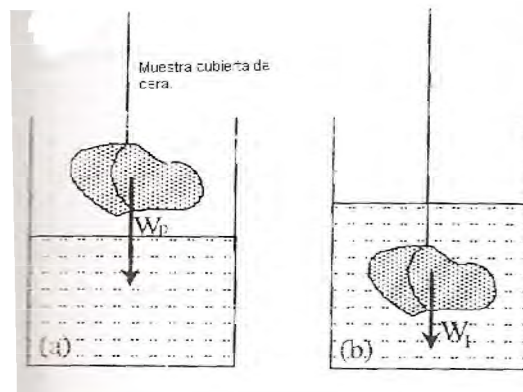


Figura 3.20 Muestra atada (Bardet, 1997).

- 3.- Sumergir el espécimen en un baño de cera caliente. La cera debe calentarse poco menos a su punto de fundición. Repetir el proceso de la inmersión para obtener un espécimen cubierto por la cera. Si la muestra es frágil y tiene una tendencia a desintegrarse, usar un cepillo para cubrirla con cera antes de sumergir completamente la muestra en el baño de cera.
- 4.- Después de que la cera ha solidificado, atar la muestra encerada a la balanza y determinar nuevamente el peso.
- 5.- Levantar el espécimen encerado y colocar un recipiente (cubeta) lleno de agua bajo la balanza y sumergir el espécimen en el agua. Registrar el peso sumergido de la muestra.
- 6.- Retirar la muestra del recipiente de agua, quite el exceso de agua con un trapo y cortar una muestra más pequeña que esté libre de cera, para determinar el contenido de agua con la ecuación (3-16). Determinar su peso específico seco con la ecuación (3-17). Por último determinar el peso específico del material con la ecuación (3-18).

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

3.5. LÍMITES DE ATTERBERG (ASTM D 4318-98).

Objetivo: Clasificar los suelos que pasan el tamiz No. 200 (suelos finos) con recurrencia de la carta de plasticidad, en donde el suelo fino se agrupa en función de su límite líquido e índice plástico.

Introducción.

La consistencia de un suelo es el grado de cohesión de sus partículas sólidas y la resistencia de un suelo es la oposición a este a fuerzas exteriores que tienden a deformar o destruir su estructura.

El científico de suelos sueco Albert Atterberg. En el año 1911 define como plasticidad como la capacidad que tiene un suelo a ser deformado. A su vez observa que los suelos arcillosos en condiciones húmedas son plásticos y se vuelven muy duros en condiciones secas, los limos no son necesariamente plásticos y se vuelven frágiles con el secado, y las arenas se desmoronan en condiciones sueltas y secas. También dedujo que existen arcillas altamente plásticas y otras de baja plasticidad.

En el desarrollo de sus ideas, observó que arcillas mezcladas con gran cantidad de agua forman un fluido apenas viscoso. Con menor cantidad de agua se vuelve un fluido con cierta rigidez que se torna pegajoso. Con la evaporación de mayor cantidad de agua la pegajosidad desaparece y la arcilla puede ser deformada. Existe un punto en donde, con el incremento de la evaporación, la propiedad de ser deformada se pierde.

De lo anterior Atterberg establece distintos estados de consistencia de los suelos plásticos según se muestra en la *Figura 3.21*.

- Límites de Atterberg
- Estado líquido: Cuando las partículas de suelo permanecen en suspensión.
 - Estado semilíquido: Cuando el suelo tiene las características de un fluido viscoso.
 - Estado plástico: Cuando el suelo se puede moldear y deformar sin exhibir propiedades elásticas, cambios de volumen o agrietamiento.
 - Estado semisólido: El suelo tiene una apariencia de un sólido pero aún disminuye su volumen al estar sujeto al secado.
 - Estado sólido: El volumen del suelo no tiene variación con respecto al secado.

Cada uno representa una resistencia de menor a mayor.

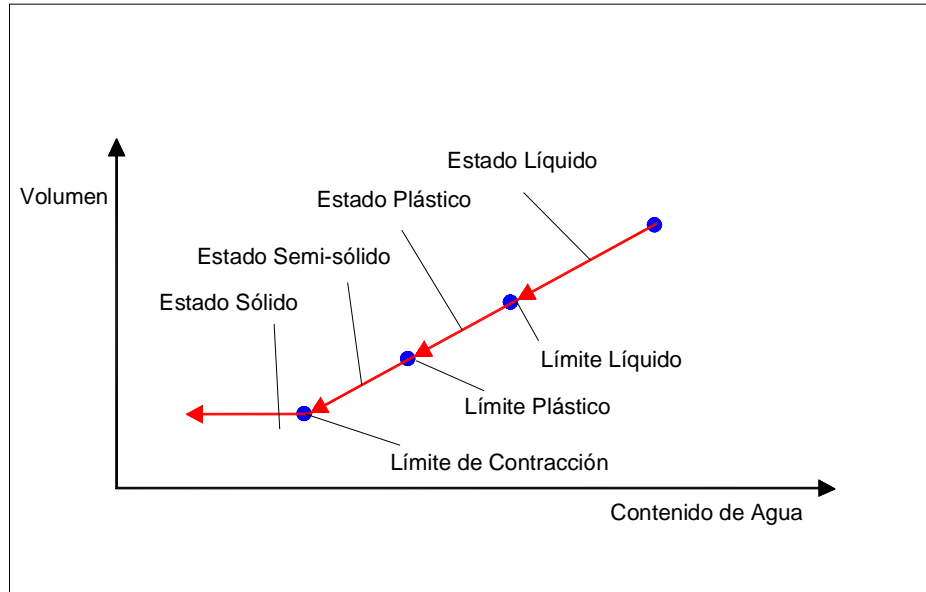


Figura 3.21 Trayectoria contenido de agua-volumen de un suelo amasado.

Atterberg sugiere que los límites *líquido* (W_L) y *plástico* (W_p) sirvan de base en la clasificación de los suelos plásticos. Acorde al valor del índice de plasticidad (PI), se distinguen los siguientes materiales:

- Suelos desmenuzables ($PI < 1$)
- Suelos débilmente plásticos ($1 < PI < 7$)
- Suelos medianamente plásticos ($7 < PI < 15$)
- Suelos altamente plásticos ($PI > 15$)

Para los propósitos de la geotecnia, los límites más importantes son el límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción.

Terminología.

Originalmente los límites de consistencia Atterberg eran seis, el límite superior de flujo viscoso (saturación), el límite líquido, el límite pegajoso, el límite de cohesión, el límite plástico y el límite de encogimiento (contracción).

Límite de cohesión: Es la cantidad de agua con la cual las partículas de un suelo son capaces de pegarse unas a otras.

Límite de pegajosidad: Es el contenido de agua con el cual el suelo comienza a pegarse en una superficie metálica tales como la cuchilla y la espátula.

Límite de contracción: Es el contenido de agua por debajo del cual no se produce reducción adicional de volumen o contracción en el suelo.

Límite plástico: Es el contenido de agua en donde se considera al suelo como material no plástico.

Límite líquido: Es el contenido de agua por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de agua, el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

Límite de saturación: Es el contenido de agua con el que el suelo tiene todos sus vacíos llenos de agua. Para nuestro estudio sólo se consideran los cuatro últimos límites.

Índice de plasticidad (PI): Es el contenido de agua entre el límite líquido y el límite plástico que definen el rango plástico del suelo. Numéricamente es la diferencia del ω_L y ω_P (Sánchez, 2003).

Consistencia: Facilidad relativa con que un suelo puede ser deformado, (Sánchez, 2003).

Carta de plasticidad.

Los suelos de grano fino se clasifican mediante la carta de plasticidad. La carta de plasticidad se muestra en *Figura 3.22*, cuando se trazan los valores de ω_L y PI para las arcillas inorgánicas, la mayoría de los puntos queda anterior o sobre la línea A y en una zona estrecha paralela a esta. La línea A se define por la ecuación.

$$PI=0.73 (\omega_L -20)\dots\dots\dots (3-19)$$

Donde el PI y ω_L están en porcentaje. La línea A es una marca de referencia que se derivada de observaciones experimentales y denota la frontera entre las arcillas y los limos.

La línea U, de la *Figura 3.5* es un límite superior provisional para todos los suelos y también se deduce de datos experimentales. La línea U tiene la ecuación (3-20).

$$PI=0.9 (\omega_L -8)\dots\dots\dots (3-20)$$

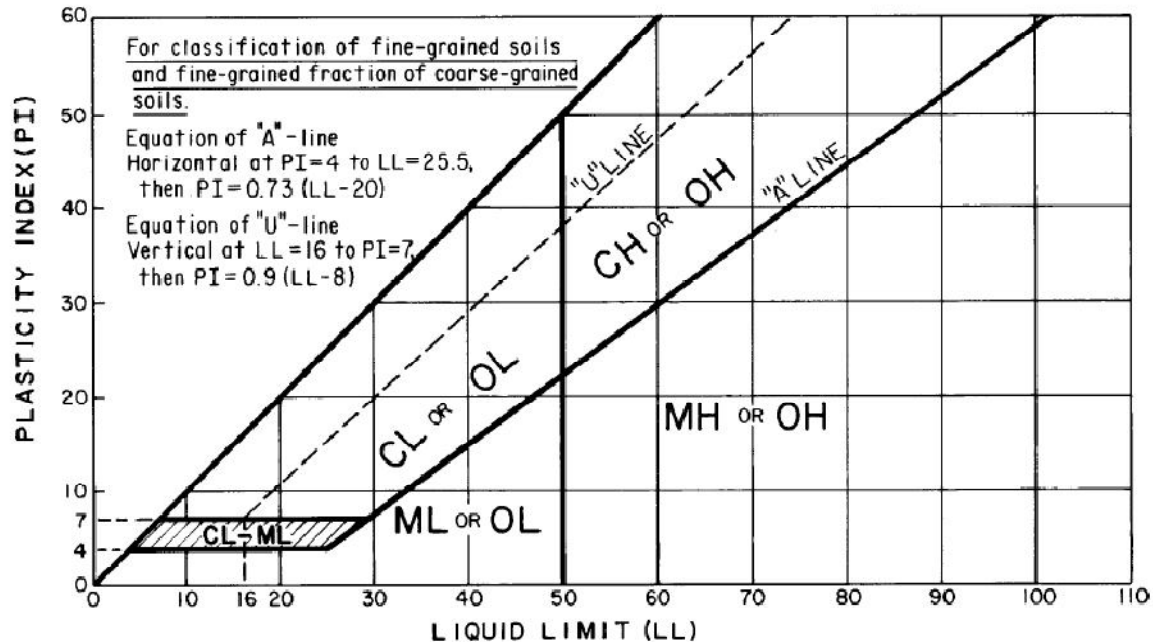


Figura 3.22 Carta de plasticidad (ASTM 2487-98).

3.5.1 Límite Líquido.

3.5.1.1. Método de la copa de Casagrande.

Límite Líquido (WL) es el contenido de agua, arriba del cual un suelo se comporta como un fluido viscoso. Atterberg no definió la forma con la cual se tenía que determinar dicho límite, por lo que Casagrande establece un procedimiento estándar de laboratorio, para obtener dicho valor. Así, el límite líquido se define arbitrariamente como el contenido de agua, en el cual un suelo previamente ranurado, cierra una abertura trapezoidal de $\frac{1}{2}$ " con 25 golpes en la copa de Casagrande (Sánchez, 2003).

La técnica se basa en el uso de la copa de Casagrande (*Figura 3.23*), que es un recipiente de bronce o de latón con un tacón solidario del mismo material, este mismo y la copa giran en torno a un eje fijo unido a la base. Una excéntrica hace que la copa caiga periódicamente, golpeándose contra la base de caucho duro del dispositivo. La altura de caída de la copa, por especificación, es de 1 cm el cual se mide verticalmente desde el punto donde la copa toca a la base al caer, hasta el punto más alto de la misma. Es importante que se realice con sumo cuidado y con ayuda del prisma metálico de 1 cm de lado para su efectiva calibración, *Figura 3.25* (Juárez, 1982).

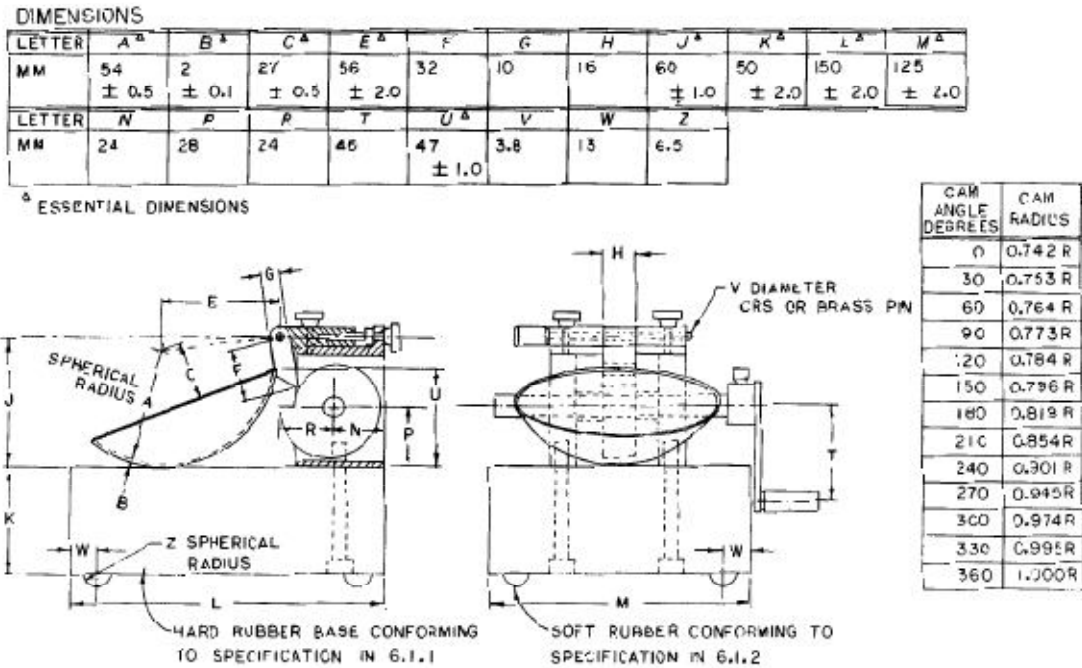


Figura 3.23 Copa de Casagrande (ASTM 2487-98).

Para realizar la calibración del dispositivo se debe colocar el prisma metálico de 1 cm de lado entre la copa y la base, se debe cuidar que la su arista superior este en contacto con el punto de la copa que golpee la base (Figura 3.24). La geometría de la copa es esférica con un radio interior de 54 mm y un espesor de 2 mm. Su peso es de 200 ± 20 gr (Juárez, 1982).

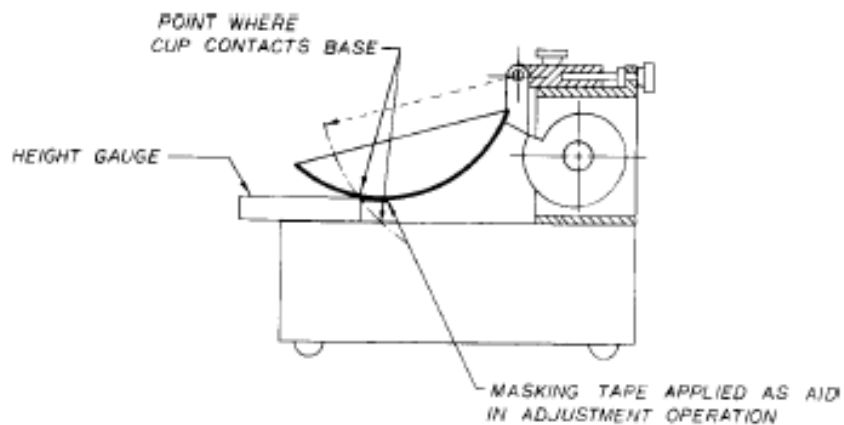


Figura 3.24 Calibración de la copa de Casagrande (ASTM 2487-98).

DIMENSIONES

LETTER	A ^Δ	B ^Δ	C ^Δ	D ^Δ	E ^Δ	F ^Δ
MM	2 ± 0.1	11 ± 0.2	40 ± 0.5	8 ± 0.1	50 ± 0.5	2 ± 0.1
LETTER	G	H	J	K ^Δ	L ^Δ	N
MM	10 MINIMUM	13	60	10 ± 0.05	50 DEG ± 1 DEG	20

^Δ ESSENTIAL DIMENSIONS

^C BACK AT LEAST 15 MM FROM TIP

NOTE: DIMENSION A SHOULD BE 1.9-2.0 AND DIMENSION D SHOULD BE 8.0-8.1 WHEN NEW TO ALLOW FOR ADEQUATE SERVICE LIFE

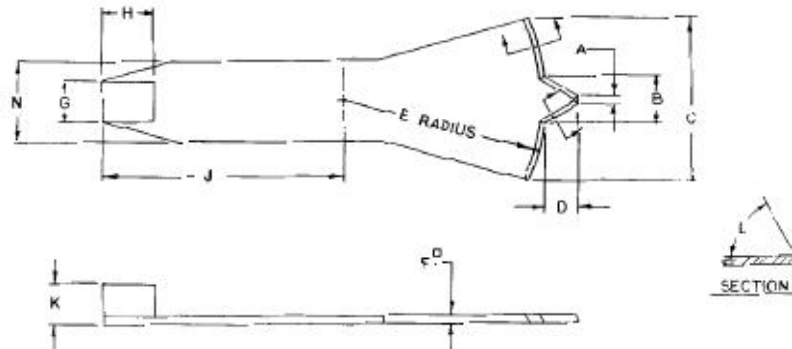


Figura 3.25 Ranuador o acanalador de la copa de Casagrande (ASTM 2487-98).

Sobre la copa se coloca el suelo previamente preparado y se le realiza una ranura trapezoidal con el ranurador. Para realizar la ranura correctamente, se sostiene la copa con la mano izquierda y el ranurador se pasa a través de la muestra manteniéndolo perpendicular a la superficie de la copa con un movimiento de arriba hacia abajo. Posteriormente se hace girar la manivela y se cuentan los golpes con los que se cierra la abertura de la copa (Juárez, 1982).

El límite líquido se determina conociendo 4 ó 5 contenidos de agua diferentes con el número de golpes correspondientes para trazar la curva de fluidez se coloca en las ordenadas el porcentaje de contenido de agua en escala aritmética y en el eje de las abscisas el número de golpes en escala logarítmica. La ecuación de la curva de fluidez es:

$$\omega = -Fw \log N + C \dots \dots \dots (3-21)$$

Donde:

ω =Contenido de agua.

Fw=Índice de fluidez, pendiente de la curva de fluidez, igual a la variación del contenido de agua correspondiente a un ciclo de la escala logarítmica.

N=Número de golpes.

C =Constante que representa la ordenada en la abscisa de 1 golpe. Se calcula prolongando la curva de fluidez (Juárez, 1982).

3.5.1.2. Método del Cono Sueco.

El método del cono se considera como un método más confiable para la determinación del límite líquido que el método de Casagrande, y se estandariza en muchos países como entre los métodos de prueba preferidos del límite líquido. Es más sencillo de realizar, los resultados no dependen tanto del diseño del aparato o del juicio del operador y puede aplicarse a una gama más amplia de suelos.

Tradicionalmente se ha usado la copa de Casagrande para la determinación del límite líquido. Este documento muestra otra alternativa, Cono Sueco. Este método se basa en la penetración de un cono metálico que cae por su propio peso, a partir de una posición de reposo en la que su punta toca la superficie enrasada del suelo por ensayar.

El Cono Sueco fue propuesto por la Comisión Geotécnica de los Ferrocarriles Estatales Suecos en 1915 para la determinación del límite líquido y para medir la resistencia cortante no drenada de suelos arcillosos, tanto inalterados como remoldeados. Derivados de este diseño se han propuesto otros conos, los cuales difieren en geometría y masa para la determinación del límite líquido con una penetración diferente.

El cono que se utiliza para determinar el límite líquido es el de $60^\circ/60g$. Quiere decir que tiene un ángulo en su ápice de 60° y una masa de 60g. El aparato consta de un pedestal con un brazo ajustable verticalmente, donde se localiza el cono y que permite que éste toque inicialmente la superficie del suelo *Figura 3.26*. La penetración del cono en la masa del suelo se mide mediante una lupa con una aproximación de 0.1 mm. El límite líquido se determina como el contenido de agua que tiene el suelo cuando el cono penetra 10mm.

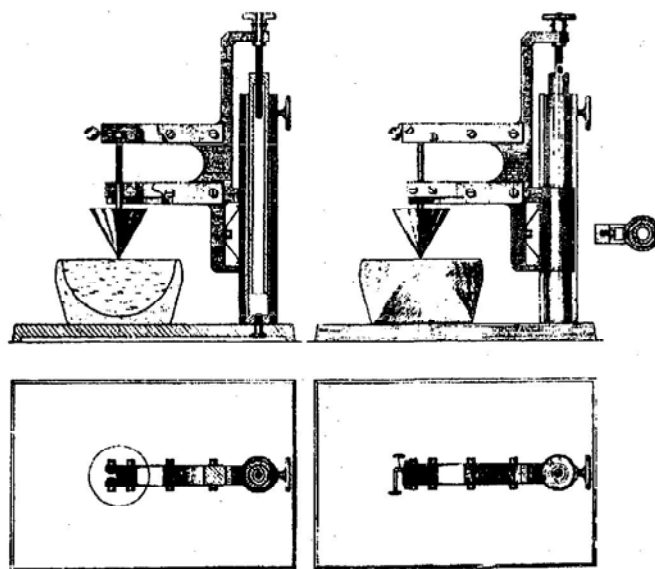


Figura 3.26. Cono Sueco (Mendoza, 1995).

El ensayo se basa en la relación entre el contenido de agua y la penetración del cono dentro de la muestra de suelo. Se dibuja un gráfico lineal del porcentaje de contenido de agua en función de la penetración en escala logarítmica y se traza la mejor recta posible a través de los puntos obtenidos. El contenido de agua correspondiente a la penetración de 10 mm se toma como el límite líquido del suelo, *Figura 3.27*. En esta figura se aprecia que la pendiente es positiva en la curva del cono por lo que a mayor valor de contenido de agua mayor penetración.

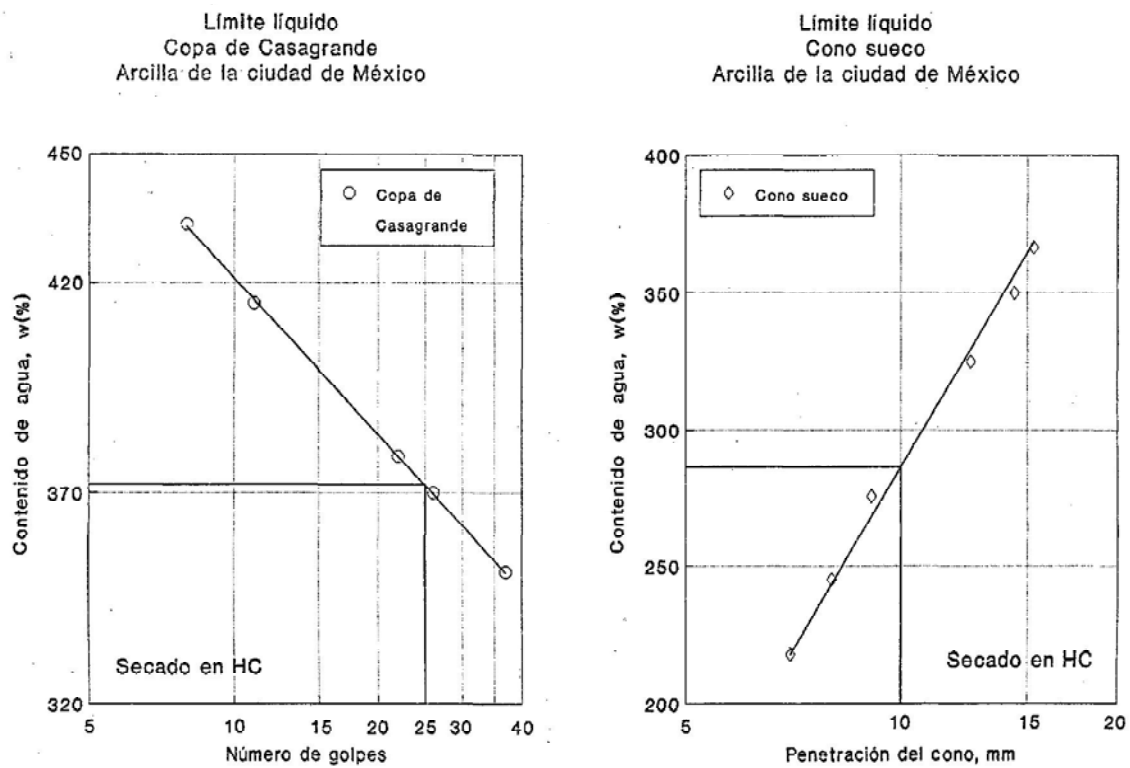


Figura 3.27. Curvas de fluidez en la copa de Casagrande y en el cono sueco en arcillas de la Ciudad de México (Mendoza 1995).

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 8

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“LÍMITE LÍQUIDO POR LOS MÉTODOS DE LA COPA DE CASAGRANDE
Y CONO SUECO.”

Práctica No. 8

Límite Líquido por el Método de la Copa de Casagrande.

Objetivo: Determinar el límite líquido de una muestra de suelo que pasa el tamiz No. 40 por el método de la copa de Casagrande.

Herramienta y Equipo.

- Copa de Casagrande.
- Ranurador o Acanalador.
- Tamiz No. 40 con abertura de 4.75 mm, de alambre de bronce o acero inoxidable y tejido en forma de cuadrícula.
- Cuchillo de bolsillo o una espátula pequeña de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho con punta redonda.
- Vidrios de reloj o capsulas de porcelana.
- Horno de convección a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Piseta.

Material.

- Muestra de suelo que pasa el tamiz No. 40.
- Agua.

Procedimiento.

1.- Limpiar y secar la copa de Casagrande.



Figura 3.28 Copa de Casagrande.

2.-Del material que pasa el tamiz No. 40 tomar una muestra de suelo de aproximadamente 250 gr. previamente lavado.

3.- Determinar el peso de las cápsulas de porcelana y vidrios de reloj a emplear.

4.- Calibrar la copa de Casagrande. Marcar con una cruz el punto donde exactamente se apoya la copa al momento de tocar la base.

5.- Con ayuda del ranurador calibrar a 1 cm la altura de caída libre de la copa. Colocar el manguete exactamente debajo de la marca de la copa. Posteriormente apretar los tornillos y verificar la altura de caída.



Figura 3.29 Calibración de la altura de caída libre de la copa de Casagrande.

6.- Colocar el suelo en un recipiente para su preparación. Agregar un poco de agua y con ayuda de la espátula remover y amasar hasta tener una pasta. *Figura 3.30.*



Figura 3.30 Preparación de la muestra de suelo.

7.- De la muestra preparada, tomar aproximadamente 50 gr. y colocarla en la parte inferior de la copa con ayuda de la espátula. Tener precaución que la superficie debe estar completamente plana y que no existan bordes o taludes. El espesor al centro de la copa debe ser de 1 cm.

8.- Colocar la punta del ranurador en la parte superior de la copa y con éste efectuar una ranura. Mantener el ranurador perpendicular al fondo de la copa y con movimiento uniforme de arriba hacia abajo realizar el corte. *Figura 3.31.*



Figura 3.31 División del suelo con el ranurador.

9.- Una vez ranurada la muestra, proceder a hacer girar uniformemente la manivela a 2 golpes / seg hasta que la ranura se cierre 1/2", se debe contar el número de golpes hasta producirse dicho cierre. *Figura 3.32.*



Figura 3.32 Giro uniforme de la manivela a razón de dos golpes por segundo.

10.- Tomar una muestra de aproximadamente 5 a 10 gr. de suelo en la zona donde se cerró la ranura y colocarla en una cápsula de porcelana para obtener su peso y llevarla al horno durante aproximadamente 18 horas y determinar su contenido de agua. *Figura 3.33.*



Figura 3.33 Obtención de la muestra de suelo.

11.- Repetir los pasos del 4 al 9 incrementando su contenido de agua. A cada muestra se le realiza la prueba con cuatro contenidos de agua diferentes, dos pruebas que estén entre 15 y 25 golpes y las otras restantes entre 15 y 35 golpes.

12.- Una vez secas las muestras de suelo y a temperatura ambiente se pesan para obtener el peso de la tara más suelo seco.

13.- Determinar los contenidos de agua y construir la curva de fluidez. En las abscisas colocar el número de golpes en escala logarítmica y en las ordenadas el contenido de agua en porcentaje. Se traza la línea de tendencia y se determina el ω_L a los 25 golpes / seg. *Figura 3.34.*

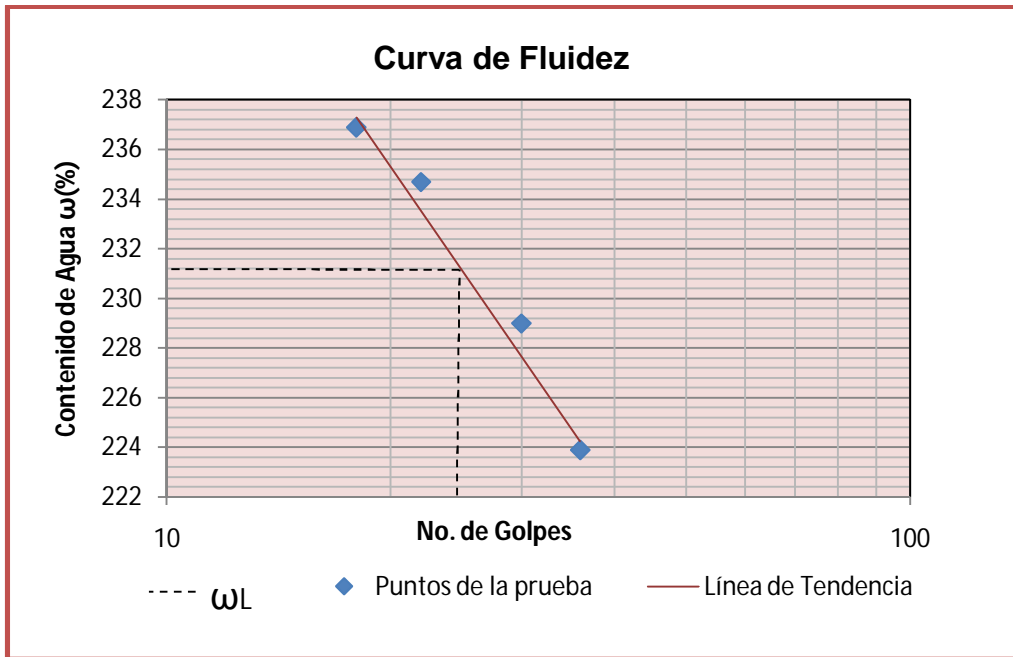


Figura 3.34 Ejemplo de Curva de Fluidez.

Límite Líquido por el Método del Cono Sueco.

Objetivo: Determinar el límite líquido de una muestra de suelo que pasa el tamiz No. 40 por el método del Cono Sueco.

Herramienta y Equipo.

- Cono Sueco.
- Horno de convección a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Cápsulas de porcelana o vidrios de reloj.
- Recipiente.
- Tamiz No. 40 con abertura de 4.75 mm, de alambre de bronce o acero inoxidable y tejido en forma de cuadrícula.
- Cuchillo de bolsillo o una espátula pequeña de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho con punta redonda.
- Lupa.
- Regla metálica de 20cm.

Material.

- Muestra de suelo.
- Agua.

Procedimiento.

- 1.- Limpiar perfectamente el cono y su recipiente.
- 2.- Tomar una muestra de suelo a ensayar.
- 3.- Determinar el peso de las cápsulas de porcelana o vidrios de reloj a emplear.
- 4.- Colocar el suelo en un recipiente para su preparación, en donde de ser necesario se le debe agregar un poco de agua y con ayuda de la espátula remover y amasar hasta tener una pasta homogénea y sin grumos.
- 5.- De la muestra preparada tomar aproximadamente 50 gr e introducirla con ayuda de la espátula en el recipiente del aparato. Tener precaución de que la superficie de la muestra dentro del recipiente debe estar completamente plana y que no existan bordes o taludes.
- 6.- Colocar el recipiente con la muestra en la parte inferior de aparato. Colocar la punta del cono exactamente sobre la superficie de la muestra.
- 7.- Dejar caer el cono sueco y determinar la penetración que se generó en la muestra.
- 8.- Tomar una muestra de aproximadamente 10 gr. de suelo en la zona donde penetró el cono y colocarla en una cápsula de porcelana para obtener su peso, llevarla al horno durante aproximadamente 18 horas y determinar su contenido de agua.

9.- Repetir los pasos del 5 al 8 incrementando su contenido de agua. A cada muestra se le realiza la prueba con 6 contenidos de agua diferentes, 3 pruebas que sean menores a una penetración de 10mm y las otras restantes mayores.

10.- Una vez secas muestras de suelo y a temperatura ambiente se pesan para obtener el peso de la tara más suelo seco.

11.- Determinar los contenidos de agua y construir la curva de fluidez. En las abscisas colocar la penetración (mm) en escala logarítmica y en las ordenadas el contenido de agua en porcentaje. Trazar la línea de tendencia y determinar el ω_L a una penetración de 10mm, *Figura 3.34*.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

3.5.2. Límite Plástico.

Objetivo: Esta prueba se usa para determinar el contenido de agua en el que el suelo se comporta plásticamente. Se lleva a cabo en el material que pasa el tamiz No. 200 y normalmente se realiza junto con la prueba del límite líquido. Por convención, el límite plástico de un suelo se define como el contenido de agua en que la muestra empieza a desmenuzarse en trozos de aproximadamente 1 cm, cuando se rola un rollito de aproximadamente 3.2 mm de diámetro.

El límite plástico, también definido por Atterberg, como el contenido de agua para el cual se producen fisuras al rolar cilindros. Terzaghi agregó la especificación que dicho espesor debe ser de 1/8 de pulgada ó 3.2 mm. El rolado debe hacerse en placas de vidrio y no sobre papel, ya que éste acelera el proceso de secado de la muestra.

Cálculos.

Calcular el límite plástico (ω_P) como el promedio de las tres determinaciones efectuadas sobre la muestra de ensaye. Dichas determinaciones no deben diferir entre sí en más de 2 puntos. Cuando no se cumpla esta condición se debe repetir todo el ensaye.

Calcular el índice de plasticidad de acuerdo con la formula siguiente:

$$PI = \omega_L - \omega_P \dots\dots\dots (3-22)$$

Donde:

PI= Índice de plasticidad del suelo, %.

ω_L = Límite líquido del suelo, %.

ω_P = Límite plástico del suelo, %.

Cuando no pueda determinarse uno de los dos límites (ω_L ó ω_P) o la diferencia es negativa, informar el índice de plasticidad como NP (no plástico).

Calcular el índice líquido de acuerdo con la formula siguiente:

$$LI = \frac{(\omega - \omega_P)}{PI} \dots\dots\dots (3-23)$$

Donde:

LI = Índice líquido del suelo.

W = Contenido de agua (natural) del suelo, %.

WP = Límite plástico del suelo, %.

PI = Índice de plasticidad del suelo, %.

Calcular el índice de consistencia de acuerdo con la formula siguiente:

$$CI = \frac{(W_L y W)}{PI} \dots\dots\dots (3-24)$$

Donde:

CI = Índice de consistencia del suelo.

WL = Límite líquido del suelo, %.

W = Contenido de agua (natural) del suelo, %.

PI = Índice de plasticidad del suelo, %.

Una vez conocidos los valores de WL y PI. Entrar a la carta de plasticidad para clasificar el suelo.

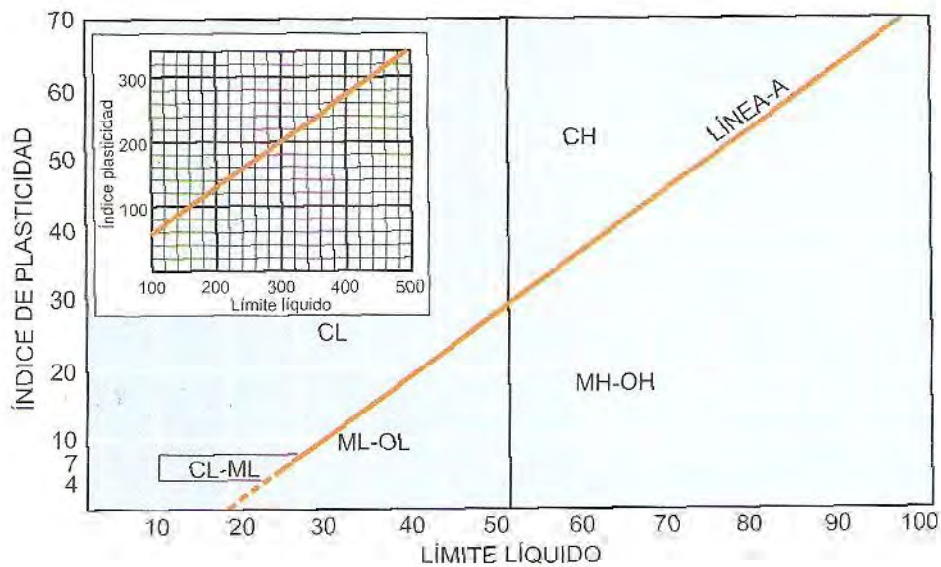


Figura 3.35 Carta de plasticidad con extensión de la línea A. (González, 2004).

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 9

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“LÍMITE PLÁSTICO.”

Práctica No. 9

Límite Plástico.

Objetivo: Determinar el contenido de agua donde el suelo se comporta plásticamente.

Herramienta y Equipo.

- Tamiz No. 40 con abertura de 4.75 mm, de alambre de bronce o acero inoxidable y tejido en forma de cuadrícula.
- Cuchillo de bolsillo o una espátula pequeña de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho con punta redonda
- Cápsulas de porcelana o vidrios de reloj.
- Horno de convección a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Placa de vidrio de 40 x 40 cm.
- Alambre de aproximadamente 3.2 mm de diámetro.
- Recipiente metálico circular.

Material.

- Muestra de suelo que pasa el tamiz No. 40
- Agua.

Procedimiento.

La prueba debe realizarse en el cuarto húmedo, con el fin de evitar el secado superficial de la muestra.

- 1.- Tomar una muestra de suelo a emplear y determinar el contenido de agua natural.
- 2.-Del material que pasa el tamiz No. 40. Tomar una muestra de suelo de aproximadamente 20 gr. Agregarle agua y con ayuda de la espátula removerlo o amasarlo hasta tener una pasta homogénea y sin grumos.
- 3.- Determinar el peso de las cápsulas de porcelana o vidrios de reloj a emplear.



Figura 3.36 Determinación del peso de la cápsula de porcelana.

- 4.-Tomar una muestra de suelo de aproximadamente 1.5 a 2 gr.

5.- Rolar la muestra de suelo con la palma de la mano sobre la placa de vidrio hasta formar un cilindro de aproximadamente 3.2 mm (1/8") de diámetro (*Figura 3.37*), el cual debe ser comparado con el alambre.



Figura 3.37 Realización del cilindro sobre la placa de vidrio.

6.- Juntar el suelo en forma de esfera y amasar nuevamente el material con fuerte presión con las puntas de los dedos y volver a construir el cilindro. Así sucesivamente repetir el procedimiento hasta que se presente desmoronamiento o separación (*Figura 3.38*).



Figura 3.38 Separación del cilindro.

7.- El límite plástico ω_P , corresponde al contenido de agua para el cual un cilindro de aproximadamente 3.2 mm de diámetro, se rompe en trozos de 0.5 a 1 cm de largo. Cuando se llega a esta condición se deberá colocar el cilindro en un vidrio de reloj o capsulas de porcelana para determinar su peso e introducirlo al horno aproximadamente 18 horas.

8.-Retirar la muestra del horno y pesar en la báscula para conocer el contenido de agua.

9.- Esta prueba se debe realizar a dos muestras más para obtener tres valores del límite plástico y verificar que no tengan una variación mayor a 2 puntos porcentuales de sus valores, de lo contrario se debe realizar nuevamente la prueba.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

3.5.3. Límite de Contracción (ASTM D422-98).

Objetivo: Determinar el límite de contracción de una muestra de suelo, en donde no se presenta variación volumétrica de la muestra al perder agua por evaporación.

En el estado semisólido, el proceso de decrecimiento de volumen del suelo, es precisamente igual al valor de agua perdida por evaporación. Sin embargo cuando el contenido de agua llega a un cierto valor mínimo, la muestra deja de disminuir su volumen con la pérdida de agua, pero el peso de la muestra continúa decreciendo. En ese punto la muestra pasa de un estado semisólido a uno sólido. El límite entre los dos estados es marcado por el cambio de color de oscuro a claro y el contenido de agua correspondiente a dicho límite, se denomina "límite de contracción".

Cálculos.

La ecuación (3-25) determina el volumen de suelo húmedo.

$$V_h = \frac{W_{merc}}{\gamma_{HG}} \dots\dots\dots (3-25)$$

Donde:

W_{merc} = Peso del mercurio.

γ_{HG} = Densidad del mercurio 13.55 gr./cm³.

La ecuación (3-26) determina el volumen de suelo seco.

$$V_s = \frac{W_{mercurio\ desplazado}}{\gamma_{HG}} \dots\dots\dots (3-26)$$

Donde:

$W_{mercurio\ desplazado}$ = Peso del mercurio desplazado al sumergir la pastilla de suelo seco.

El límite de contracción se obtiene mediante la ecuación (3-27).

$$LC = \left(W_i - \frac{V_i - V_f}{W_s} \right) \times 100 \dots\dots\dots (3-27)$$

Donde:

W_i = Contenido de agua natural.

V_i = Volumen de la pastilla de suelo húmedo.

V_f = Volumen de la pastilla de suelo seco.

W_s = Peso del suelo seco.

La relación de contracción (R): Es la relación entre un cambio de volumen dado y su cambio de contenido de agua sobre el límite de contracción. El cambio volumétrico del suelo, se define como la disminución de volumen que presenta la masa de suelo, cuando el contenido de agua (%) disminuye.

$$R = \frac{W_s}{V_s} \dots\dots\dots (3-28)$$

Donde:

W_s = Peso del suelo seco.

V_s = Volumen de la pastilla de suelo seco.

Contracción lineal.

La contracción lineal se calcula bajo la base de que la reducción de volumen de un suelo es uniforme en todas las direcciones.

La contracción lineal se obtiene modelando una barra de suelo en un molde rectangular (misma técnica de llenado y secado que en la prueba del límite de contracción volumétrica), y haciendo uso de la siguiente ecuación:



Figura 3.39 Barra de molde rectangular.

$$LC\% = \frac{(L_o - L_f)}{L_o} \dots\dots\dots (3-29)$$

Donde:

L_o = Longitud inicial de la barra de suelo húmedo (equivale a la longitud del molde).

L_f = Longitud final de la barra de suelo seco.

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 10

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“LÍMITE DE CONTRACCIÓN.”

Material.

- Muestra de suelo.
- Agua.
- Mercurio 300 cm^3 .
- Vaselina o Aceite.

Procedimiento.

1.-Tomar 30 gr. del material que pasa el tamiz No. 40. Colocarla en la cápsula de 14 cm de diámetro, posteriormente añadir agua hasta formar una pasta de consistencia similar a la del límite líquido.

2.- Cubrir el petri con una capa delgada de vaselina o aceite, para que el material no se adhiera a las paredes. Determinar su peso.

3.- Colocar el petri dentro del plato de evaporación y llenar completamente con mercurio hasta derramarlo. *Figura 3.41*. Retirar el excedente de mercurio apretando firmemente la placa de cristal por encima del petri, procurando que no se encuentre aire atrapado entre la placa y el mercurio, si es así cambiar el petri y repetir el proceso.



Figura 3.41 Petri lleno de mercurio.

4.- Determinar el volumen de mercurio contenido en el petri con las siguientes 2 opciones:

- a) Vaciar el mercurio contenido en el plato en una probeta graduada y tomar la lectura del volumen.
- b) Pesar el petri con mercurio, determinar el peso del mercurio y dividir el valor entre su densidad 13.55 $gr./cm^3$. el resultado obtenido es el volumen del mercurio. Usar la ecuación 3-25.

5.-Llenar el petri con la pasta preparada en tres capas. Colocar una porción de suelo húmedo de aproximadamente 1/3 de la capacidad del molde en el centro de éste. Golpear el conjunto sobre un cojín protector especial para remover las posibles burbujas de aire y obtener una distribución uniforme del material. Agregar una cantidad de material similar a la anterior y compactar para obtener la salida de aire a la superficie. Colocar la otra

porción de suelo hasta llenar el recipiente y con ayuda de la espátula o cuchillo enrasar la superficie para retirar el material sobrante. *Figura 3.42.*



Figura 3.42 Petri completamente lleno de suelo.

6.- Determinar el peso del recipiente con el material húmedo. Dejar que seque al aire libre antes de colocarlo en el horno, posteriormente se introduce al horno hasta que seque completamente. Este lento proceso de secado se realiza con el fin de evitar el agrietamiento de las muestras.

El volumen del suelo húmedo es igual al volumen del petri.

7.- Retirar la muestra del horno, y determinar su peso a una temperatura ambiente. Retirar la pastilla de suelo seco del molde.

8.- Colocar el vaso de cristal en el plato de evaporación para recoger el excedente de mercurio. Llenar el vaso hasta inundar con mercurio. Retirar el exceso de mercurio. Depositar la pastilla de suelo seco en el mercurio, sumergiéndola con la palca de metal de 3 dientes hasta que toque encima del recipiente. Observar si hay aire atrapado bajo la placa y el suelo, si es así cambiar el recipiente y repetir el proceso. Limpiar cuidadosamente el mercurio que puede estar adherido fuera del recipiente.

9.- Determinar el volumen de la muestra seca con la ecuación 3-26.

10.- Determinar el límite de contracción y la relación de contracción con ayuda de las ecuaciones 3-27 y 3-28.

11.- Determinar la contracción lineal con la ecuación 3-29.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

3.6. GRANULOMETRÍA (ASTM D422-63).

Objetivo: Determinar la clasificación de muestras de suelo respecto al SUCS, que son pasadas a través de una pila de tamices, de malla decreciente y se determina el peso retenido en cada tamiz y construir la curva de distribución granulométrica.

Introducción.

El análisis granulométrico se refiere a la determinación de la cantidad en porciento de los diferentes tamaños de las partículas que constituyen al suelo. Existen diferentes procedimientos para la determinación de la composición granulométrica de un determinado suelo. Para la clasificación por tamaños de las partículas gruesas el procedimiento más expedito es por medio de tamices. Al aumentar la finura de los granos el tamizado se hace más complicado, por lo que se recurre al método por sedimentación (Crespo, 2004).

3.6.1. Método de tamices.

El análisis granulométrico por medio de tamices se aplica al fragmento de suelo que se retiene en el tamiz No. 200. Los granos más pequeños que 0.075 mm son ordenados mediante el uso de la sedimentación (análisis del hidrómetro). El cribado pueden realizarse en cualquier condición ya sea húmeda o en condiciones secas.

Los límites del tamaño de las partículas que constituyen un suelo, ofrecen un criterio para una clasificación descriptiva del mismo. Generalmente el suelo se dividía en tres o cuatro fracciones debido a lo molesto de los procedimientos disponibles para la separación de las partículas por tamaños. Posteriormente, con la técnica del cribado, fue posible obtener el trazo de las curvas granulométricas que contiene agrupaciones de diversos tamaños de las partículas del suelo (Juárez, 1982).

El tamaño del espécimen representativo para la prueba depende del tamaño máximo de la partícula. En la Tabla 3.2 se muestran algunas pautas para seleccionar el peso mínimo del espécimen.

Tabla 3.2 Peso aproximado de la muestra granulométrica (Bardet, 1997).

Tamaño máximo de las partículas (cm)	Peso mínimo del espécimen (kg)
7.5	6
5	4
2.5	2
1	1
0.475	0.2
0.2	0.1

El método de tamices tienen dos diferentes procedimientos: por lavado y sin lavado (seco). El primer método se usa para cuando la muestra de suelo representativa contiene una cantidad significativa de material fino. El cribado seco sólo se usa para los suelos con una cantidad despreciable de material fino, como las arenas gruesas y las arenas limpias. Por otro lado el cribado húmedo se realiza en suelo con material plástico.

Durante el procedimiento de la preparación, la muestra se divide en dos porciones. Una porción contiene sólo partículas que se retienen en el tamiz No. 10 (2.00 mm), mientras que la otra porción contiene sólo partículas que pasan el tamiz No. 10.

La gráfica granulométrica se dibuja en el eje de las ordenadas, el porcentaje en peso que pasa la muestra, y en el eje de las abscisas el diámetro de las partículas o la abertura del tamiz en escala logarítmica *Figura 3.43*. La forma de la curva da una idea inmediata de la distribución granulométrica del suelo. Un suelo constituido por partículas de un solo tamaño se representa por una línea vertical (Juárez, 1982).

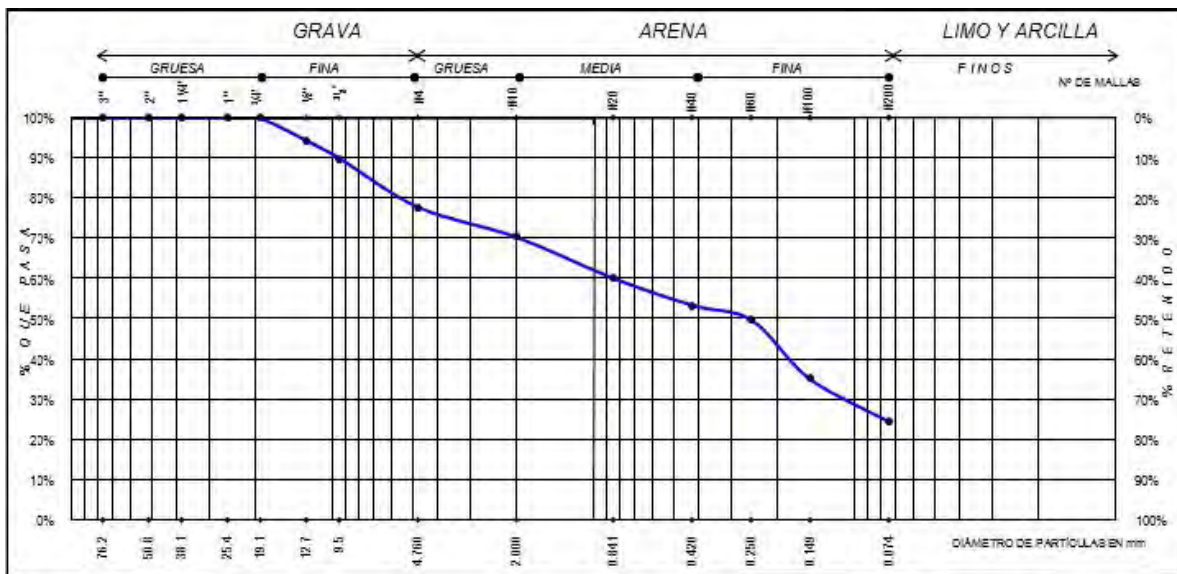


Figura 3.43 Curva granulométrica

3.6.2. Método del Hidrómetro.

El método establece un procedimiento para la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de partículas en los materiales finos. El tamiz de menor abertura que se utiliza en el laboratorio es el No. 200, cuya separación entre hilos es de 0.075 mm, este tamiz permite el paso de las partículas de arcilla y el limo. Sin embargo no se puede diferenciar las cantidades presentes en el suelo. Para omitir estas dificultades se emplea un análisis que se basa en la medición de las velocidades de sedimentación de una esfera en un medio fluido, este problema fue estudiado por el físico G.G. Stokes en 1850.

La ley de Stokes establece la velocidad de caída de una partícula esférica a través de un medio líquido, función del diámetro y del peso específico de la partícula.

Con la aplicación de esta ley se obtiene el diámetro equivalente de la partícula. Se considera que la partícula tiene la misma densidad de sólidos que el suelo y que se sedimenta con la misma velocidad que la partícula real.

La ley de Stokes está dada por la siguiente expresión:

$$v = \frac{2}{9} \frac{\gamma_s - \gamma_f}{n} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \dots\dots\dots (3-30)$$

Donde:

v= Velocidad de sedimentación de la esfera, en cm/seg.

γ_s =Peso específico de la esfera, en gr./cm³.

γ_f =Peso específico del fluido, en gr./ cm³ (varía con la temperatura).

n=Viscosidad del fluido, en gr.*seg/ cm² (varía con la temperatura).

D=Diámetro de la esfera, en cm.

El rango de los diámetros de las partículas de suelo para los cuales esta ecuación es válida, es aproximadamente: 0.0002 < D < 0.2 mm.

El método del hidrómetro considera las siguientes hipótesis.

- a) La ley de Stokes es aplicable a una suspensión de suelo.
- b) En el comienzo de la prueba, la suspensión es uniforme y de concentración suficientemente baja para que las partículas no se interfieran al sedimentarse.
- c) El área de la sección recta del bulbo del hidrómetro es despreciable en comparación a la de la probeta, donde tiene lugar la sedimentación, de manera que dicho bulbo no interfiere en la sedimentación de las partículas en el instante de efectuarse la medición (Juárez, 1982).

Terminología.

Granulometría: Distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen a una muestra de suelo.

Curva granulométrica: Representación gráfica del ensayo granulométrico. A partir de ella es posible observar la graduación de un suelo.

Tamiz: Elemento metálico formado por marcos, tejido, depósito receptor y tapa. El marco es circular con diámetro de 20 ó 30 cm, suficientemente rígido y firme para fijar el tejido.

El tejido es una malla de alambre con aberturas cuadradas, que se encuentra fijado en los bordes del marco. Cada juego de tamices debe estar provisto de un depósito para la recepción del material más fino y una tapa que evite la pérdida del material.

Cálculos para el método del tamizado.

Porcentaje retenido en un tamiz: Corresponde al porcentaje, en masa, del suelo directamente retenido en ese tamiz.

$$\% \text{ Retenido} = \frac{W_{\text{suelo retenido}}}{W_m} \times 100 \dots\dots\dots (3-31)$$

Porcentaje Retenido Acumulado: Corresponde al porcentaje, en masa, de todas las partículas de mayor tamaño que la abertura de un determinado tamiz. Se calcula como la suma de todos los porcentajes parciales retenidos en los tamices de abertura de mayor tamaño más el porcentaje retenido en ese tamiz.

$$\% \text{ Retenido Acum.} = \text{Suma del \% Retenido en los tamices de abertura mayor} \dots (3-32)$$

Porcentaje que pasa por un tamiz: Corresponde al porcentaje, en masa, de todas las partículas de menor tamaño que la abertura de un determinado tamiz. Se calcula como la diferencia entre el 100% y el porcentaje acumulado retenido en ese tamiz.

$$\% \text{ Que Pasa} = 100 - \% \text{ Retenido en el tamiz} \dots\dots\dots (3-33)$$

Para calcular los valores de los coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c) se usan las ecuaciones (1-1) y (1-2), así como sus condiciones para la clasificación de la muestra de bien o mal graduada, que se muestran en el primer capítulo.

Cálculos para el método del hidrómetro.

Para la determinación del diámetro de las partículas de suelo, se usa la ecuación (3-34) que se deduce de la ecuación (3-30).

$$D = \sqrt{\frac{1,800nv}{\gamma_s - \gamma_f}} \dots\dots\dots (3-34)$$

Donde:

v = Velocidad de sedimentación de la esfera, en cm/seg.

$$v = \frac{H}{t} \dots\dots\dots (3-35)$$

H =Altura de caída con corrección por menisco (cm).

t =Tiempo (seg).

γ_s =Densidad de sólidos de la esfera (gr/cm^3).

γ_f =Peso específico del fluido, (gr/cm^3). (Varía con la temperatura).

n =Viscosidad del fluido, ($\text{gr}\cdot\text{seg}/\text{cm}^2$). (Varía con la temperatura).

D =Diámetro de la esfera, (cm).

Para una mayor comodidad en los cálculos, la ecuación anterior (3-34) se puede simplificar de la siguiente manera:

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \dots\dots\dots (3-36)$$

Donde:

K = Constante que depende de la temperatura y gravedad específica del suelo usado. *Tabla 3.3.*

t = Intervalo de tiempo (min) desde el inicio de la sedimentación y el momento de la lectura.

L =Lectura original del hidrómetro (cm), corregida por menisco ($L=H$) su valor se determina por medio de la *Tabla 3.4.*

D =Diámetro de la partícula (mm).

Tabla 3.3 Valores de K para varias combinaciones de pesos unitarios y temperaturas para el diámetro de las partículas (ASTM D422-98).

Pesos unitarios del suelo (g/cm^3).

Temp. (°C)	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 3.4 Valores de L (profundidad efectiva) para usar en la fórmula de Stokes en la determinación de diámetros de partículas con el Hidrómetro 152H (ASTM D422-98).

Lectura original del Hidrómetro (corregida por menisco solamente)	Profundidad efectiva L en cm	Lectura original del Hidrómetro (corregida por menisco solamente)	Profundidad efectiva L en cm	Lectura original del Hidrómetro (corregida por menisco solamente)	Profundidad efectiva L en 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	17,7	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		

La forma de determinar el porcentaje de suelos retenido en suspensión es con la ecuación (3-38) que presenta una corrección de la densidad de sólidos.

$$P = \left(\frac{Rc \ a}{W_s} \right) \times 100 \dots\dots\dots (3-37)$$

Donde:

P=Porcentaje de suelo retenido en suspensión.

Rc=Lectura corregida del hidrómetro. La cual se deduce con la ecuación (3-39).

a=Factor de corrección de la densidad de sólidos *Tabla 3.6*.

Ws=Peso de la muestra seca utilizado en el ensayo.

Donde:

$$R_c = mT - Cd \dots\dots\dots (3-38)$$

mT= Corrección por temperatura *Tabla 3.5.*

Cd= Corrección por defloculante.

Tabla 3.5 Factores de corrección por temperatura m_T	
Temp. (°C)	m_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 3.6 Valores del factor de corrección, *a* (ASTM D422-98).

Densidad de sólidos	Factor de corrección
2,95	0,94
2,90	0,95
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	1,03
2,45	1,05

Con los valores obtenidos construir la gráfica granulométrica, en el eje de las abscisas el porcentaje de finos en escala natural y en las ordenadas el diámetro de las partículas en escala semilogarítmica.

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 11

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“GRANULOMETRÍA”.

MÉTODO DE TAMICES E HIDRÓMETRO.

Práctica No. 11

Granulometría.

Método de tamices.

Objetivo: Determinar el tamaño de las partículas de una muestra de suelo a través del método por tamices, para las partículas mayores al tamiz No. 200.

Herramienta y Equipo.

- Horno de convección a una temperatura de $105\pm^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Balanza con 120 kg de capacidad y aproximación de 10 grs.
- Juego de tamices 3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", No. 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200. Con tapa y fondo.
- Mazo de madera con masa de 1 kg de forma prismática rectangular, de 15 cm de altura y 9.5 cm de base por lado.
- Charolas de lámina galvanizada, rectangular de 40x70x10 cm.
- Máquina cribadora de acción mecánica, activada por un motor eléctrico
- Cepillos con las dimensiones y cerdas adecuadas para desprender el material adherido de los tamices.
- Cucharón de 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura.
- Recipientes con tapa y dimensiones suficientes para contener la porción de la muestra retenida en los tamices, resistente a la corrosión y a las altas temperaturas.
- Pala de acero de forma rectangular.
- Cápsulas de porcelana.
- Vaso de aluminio.
- Alambroón de punta redondeada.

Material.

- Muestra de suelo.
- Agua destilada.
- Bolsas de plástico.

Análisis con el método de lavado.

Procedimiento

1.- Tomar una muestra de suelo a emplear e introducirla al horno para su secado. Tabla 3.2

2.- Retirar la muestra del horno y determinar su peso (W_m). Realizar el cuarteo de la muestra como se describe en el capítulo 1.

3.- Colocar en una charola metálica la muestra de suelo y disgregar los grumos con ayuda del mazo de madera. Evitar romper los granos. *Figura 3.44.*



Figura 3.44 Muestra de suelo.

4.- Colocar el juego de tamices en orden progresivo hasta el No. 4 y colocar la tapa y el fondo. A continuación se hace pasar el material por los tamices. (*Figura 3.45*) Determinar el peso del material retenido en cada tamiz, vaciándolo a una cápsula de peso conocido y registrarlo.



Figura 3.45 Vaciado del material en los tamices.

5.- Del material que pasa el tamiz No. 4. Tomar una porción de aproximadamente 200 gr y colocarla en una cápsula e introducirla al horno. Retirar la cápsula del horno.

6.- Si la muestra presenta grumos colocarla en un vaso de aluminio y agua hasta saturar la muestra. Dejar reposar aproximadamente 24 horas.

7.- Con el fin de eliminar los finos lavar el material con agua corriente a través del tamiz No. 200. Agitar el suelo con ayuda del alambión de punta redondeada, realizando figuras en forma de ochos durante 15 segundos, hasta que el agua salga limpia del tamiz.

8.- Colocar el material retenido en una cápsula e introducirlo al horno hasta que seque. Dejar enfriar el material.

9.- Colocar los tamices en orden progresivo de No. 10 al 200 y colocar la tapa y el fondo. Llevar el juego de tamices a la máquina vibradora por un tiempo no mayor a 15 minutos. *Figura 3.46.*



Figura 3.46 Maquina vibradora.

10.- Vaciar la porción de material retenido en una cápsula de peso conocido y determinar su peso. Proceder de la misma forma para los tamices siguientes.

11.- Calcular el porcentaje retenido y el porcentaje que pasa. Posteriormente realizar la curva granulométrica.

12.- Calcular el porcentaje de grava, arena y finos. Así como los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c) con las ecuaciones (1-1) y (1-2) mostradas en el primer capítulo.

Análisis con el método sin lavado.

Procedimiento

Para realizar este análisis se sigue el procedimiento anterior excepto los pasos del 5 al 8.

Es importante señalar que el análisis con lavado se lleva a cabo cuando el contenido de partículas finas en la muestra es alto, de esta forma se obtiene el porcentaje de finos lo cual determina si la clasificación se realiza por medio de granulometría o por medio de los límites de Atterberg. El análisis sin lavado se realiza en muestra con contenidos bajos de finos.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

Granulometría.

Método del hidrómetro.

Objetivo: Determinar el tamaño de las partículas de una muestra de suelo a través del análisis hidrométrico para las partículas que pasan el tamiz No. 200.

Herramienta y Equipo.

- Hidrómetro graduado, calibrado a una temperatura de 20°C.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Cilindro de sedimentación o probeta de 1000 cm^3 .
- Probeta de 500 cm^3 .
- Termómetro con un rango de 0 a 50°C y aproximación de 0.1°C.
- Batidor mecánico.
- Cápsulas de porcelana.
- Cronómetro.
- Cuchillo de bolsillo o una espátula pequeña de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho con punta redonda.
- Cuenta gotas o Pipeta de vidrio.
- Vaso de precipitado de 1000 mL.

Material.

- Muestra de suelo.
- Agua destilada.
- Paño suave.
- Silicato de sodio.
- Ácido clorhídrico.

Procedimiento.

- 1.- Tomar una muestra de 50 gr suelo de que pasa la malla No. 200 y 100 gr de suelo que pasa la malla No. 4, previamente seco.
- 2.- Determinar el peso específico de las partículas sólidas.
- 3.- Colocar una parte del suelo en el vaso de precipitado y añadir 125 mL de solución de silicato de sodio a 40 gr/L, posteriormente añadir 300 cm^3 de agua destilada y con ayuda de la espátula mezclar hasta que alcanzar la consistencia de una pasta suave. Dejar reposar por 16 horas.

4.- Colocar la pasta en el batidor mecánico y añadir el resto de la solución preparada. Mantener la mezcla por 15 minutos en el batidor. *Figura 3.47.*



Figura 3.47 Muestra de suelo en el batidor añadiendo la solución.

5.- Determinar la corrección por agente dispersión (C_d) y la corrección por menisco (C_m). Las correcciones se muestran en la calibración del hidrómetro.

6.- Pasar la solución a una probeta o cilindro de sedimentación de 1000 ml y agregar agua destilada hasta completar los 1000 ml. *Figura 3.48.*

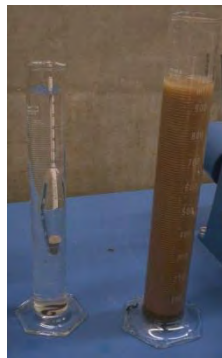


Figura 3.48 Transferencia de la solución.

7.- Tapar el orificio de la probeta con la palma de la mano y agitar vigorosamente por 1 minuto, invertir frecuentemente la probeta. *Figura 3.49.*



Figura 3.49 Transferencia de la solución.

8.- Colocar la probeta sobre una superficie fija e introducir lentamente el hidrómetro en la suspensión, esta operación debe tardar de 20 a 25 segundos. Para retirar el hidrómetro se debe cumplir con el mismo tiempo de 20 a 25 segundos. *Figura 3.50.*

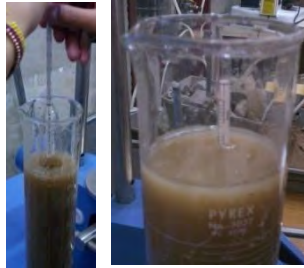


Figura 3.50 Colocación del hidrómetro lentamente en la probeta.

9.- Una vez que el hidrómetro esté sumergido, con ayuda de un cronómetro se debe tomar lecturas a 0.5, 1, y 2 minutos. Al final de la última lectura se deberá retirar suavemente el aparato, sumergirlo en agua limpia y secar con un paño.

10.- Realizar el mismo procedimiento para los tiempos de 5, 15, 30, 60, 120, 240 y 1440 minutos. Retirar el hidrómetro al final de cada lectura.

11.- Medir la temperatura de la suspensión una vez los primeros 15 minutos y posteriormente en cada lectura. Las lecturas de temperatura no deben diferir en más del 2%.

12.- Tapar la probeta entre cada lectura para impedir la evaporación de la suspensión.

13.- Una vez concluida la prueba determinar el peso seco de la muestra. Pasar la solución a un recipiente y agregar gotas de ácido clorhídrico y agitar suavemente para lograr que la suspensión se precipite en menor tiempo. Colocar el recipiente dentro del horno hasta el secado de la muestra.

14.- Determinar el diámetro de las partículas con la ecuación (3-36).

15.- Determinar el porcentaje de finos retenido en suspensión con la ecuación (3-37).

16.- Realizar la curva granulométrica.

CAPÍTULO 4. PRUEBAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS.

Objetivo: Realizar las pruebas del laboratorio para conocer las propiedades mecánicas del suelo.

3.7. CONSOLIDACIÓN (ASTM D2435-96).

Objetivo: Determinar la deformación que sufre un suelo a través de la aplicación de cargas crecientes, así mismo los coeficientes que se requieren para la estimación de asentamientos a través del tiempo.

Introducción.

Los materiales que se utilizan en ingeniería al aplicarles fuerzas exteriores sufren deformaciones de acuerdo con una determinada relación esfuerzo-deformación. A un suelo saturado al que se le aplican fuerzas exteriores se le provoca una deformación, pero está no es instantánea, en este caso se produce un retraso de la deformación con respecto al esfuerzo y por lo tanto se tiene una relación esfuerzo-deformación-tiempo.

Si al suelo saturado se le somete a un incremento de carga, la acción de ésta se transmite en un principio al agua que llena los poros del material, por ser el líquido incompresible comparado con la estructura que forman las partículas sólidas del suelo. Debido a la presión que se induce de este modo en el agua, ésta fluye hacia las fronteras en las cuales dicha presión se disipa, produciéndose variaciones en el volumen del material y la transferencia de carga a la estructura sólida. La velocidad con la que se produce este fenómeno, se conoce como consolidación.

La prueba de consolidación consiste en comprimir verticalmente un espécimen del material que se estudia, confinado en un anillo rígido, donde se sigue una secuencia de cargas establecidas. En todos los casos y para cada incremento de carga, el espécimen sufre una primera deformación, correspondiente al retraso hidrodinámico que se llama consolidación primaria y también sufre una deformación adicional debida a un fenómeno secundario. En general el suelo siempre se deformará una cantidad mayor que la correspondiente al retraso hidrodinámico (CNA, 1990).

La prueba de consolidación se usa para conocer el asentamiento de un suelo sometido a una carga.

Hipótesis:

- Estrato de suelo homogéneo, isótropo y de espesor constante.
- Estrato saturado 100% entre 1 ó 2 superficies más permeables.
- Compresibilidad del agua y los granos, despreciable.
- Acciones similares de masas infinitesimales o masas grandes.
- Compresión unidimensional, en dirección normal a la capa de suelo.
- Validez de la ley de Darcy.
- Valores constantes de las profundidades del suelo.

- Relación lineal entre relación de vacíos y presión.
- Deformaciones lentas que permitan despreciar las fuerzas de inercia.

Con los datos obtenidos de la prueba se construye una gráfica semilogarítmica que permite conocer el tiempo en el cual se ha alcanzado la consolidación completa del espécimen bajo el incremento de carga correspondiente, *Figura 4.1*. La gráfica así obtenida (una para cada incremento de carga) recibe el nombre de curva de consolidación y de acuerdo con Terzagui la zona de intersección de los puntos C y D hacia arriba donde comienza la curva, representa el proceso de deformación del suelo gobernado por la expulsión del agua de los poros y que llamó consolidación primaria. La zona de intersección de los puntos mencionados a donde termina la curva, corresponde a un proceso de deformación donde se atribuye al reacomodo plástico de las partículas del suelo, conocido como consolidación secundaria.

La zona de intersección mencionada corresponde teóricamente al tiempo en el que la presión del agua de los poros del espécimen se ha disipado casi completamente, en ese momento se considera que la presión total aplicada está siendo soportada por las partículas del suelo. Se dice entonces que se ha logrado el 100% de consolidación primaria (Crespo, 2004).

Curva de Consolidación.

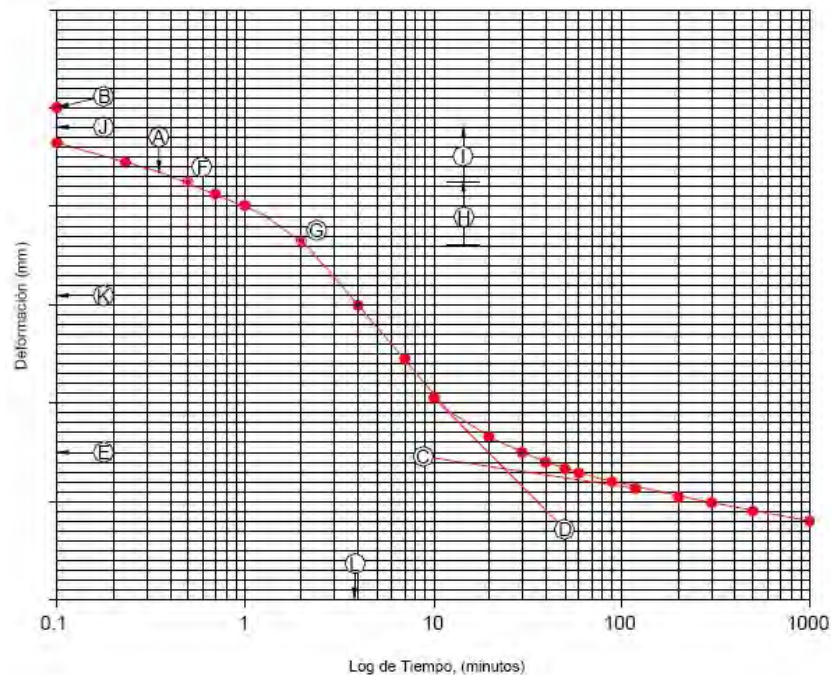


Figura 4.1 Curva tiempo-deformación (ASTM D2435-96).

Donde:

A=Punto de la curva tiempo-deformación.

B=Deformación a cero minutos.

C y D=tangentes de las curvas de consolidación primaria y secundaria.

E= Intersección de las líneas C y D para d_{100} .

F=Punto $t_{1/4}$.

G=Punto t_1 es cuatro veces $t_{1/4}$ (La deformación al tiempo t_1 debe ser menor al 50% de la deformación total).

H= Incremento de deformación entre $t_{1/4}$ y t_1 .

I= Incremento de deformación igual a H.

J= d_0 deformación inicial.

K= d_{50} medido de d_0 y d_{100} .

L= t_{50} para K= d_{50} .

Para encontrar la línea de 0% de consolidación, se debe escoger un punto de la curva próximo al eje de las deformaciones (F) y observar el tiempo que le corresponde en el eje de las abscisas y buscar sobre la curva el punto cuya abscisa sea 4 veces el tiempo originalmente elegido (G). Proyectar los puntos en las ordenadas y determinar la diferencia de ordenadas (H) de los puntos, duplicar el valor hacia arriba (I) sobre una paralela al eje de los tiempos, que es la que define el 0% de consolidación. El 100% de consolidación queda definido por la intersección de las tangentes C y D (punto E). Definidos el 0 y el 100% de consolidación, el punto medio del segmento entre ambos corresponde al 50% teórico de consolidación (K) y el tiempo correspondiente a este porcentaje es t_{50} (L).

Una vez que el suelo alcanza su máxima deformación bajo la carga aplicada, el valor de la relación de vacíos es menor que el inicial y q puede deducirse a partir de los datos iniciales de la muestra y las lecturas del extensómetro. Para cada incremento de carga aplicada se tiene un valor de la relación de vacíos y otro de la presión correspondiente actuante sobre el espécimen. Aplicados todos los incrementos de carga se tiene los valores para realizar un gráfico en cuyas abscisas se colocan los valores de la presión actuante sobre la muestra de suelo, en una escala natural o logarítmica y en las ordenadas la relación de vacíos en escala natural.

Esta curva se llama de compresibilidad, *Figura 4.2* la cual se obtiene de una prueba de consolidación completa. En una curva de este tipo se definen tres tramos diferentes el tramo A es curvo y comienza en la proximidad de su unión con el tramo B. El tramo B es aproximadamente recto y con él se llega al final de la etapa de carga de la prueba, al aplicar al máximo incremento de carga, al cual corresponde la máxima presión sobre la muestra.

A partir de este punto es común someter a la muestra en una segunda etapa la de descarga en la que se somete el espécimen a descargas de cargas decrecientes, permaneciendo cada decremento el tiempo suficiente para que la velocidad de deformación se reduzca prácticamente a cero, en esta etapa se presenta una recuperación del suelo y este no vuelve a tomar de nuevo su relación de vacíos inicial, este es el tramo C.

Curva de Compresibilidad.

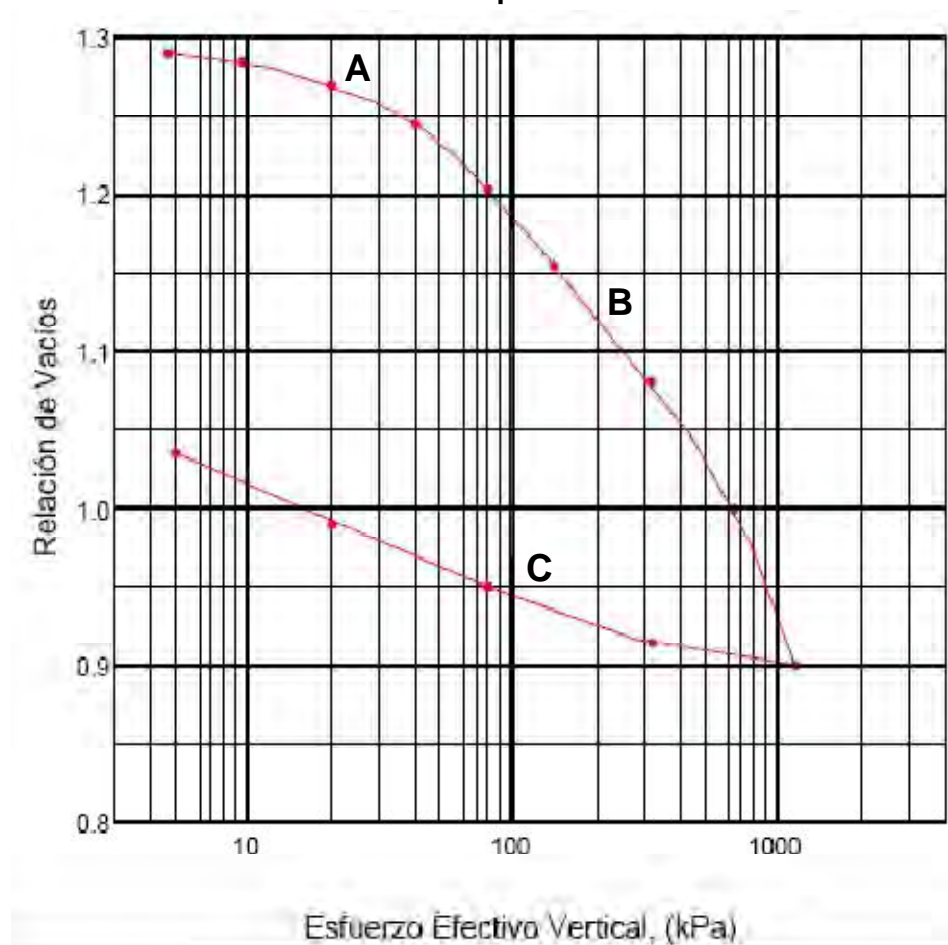


Figura 4.2 Ejemplo de la curva de compresibilidad (ASTM D2435-96).

Carga de preconsolidación (P_c).

En la zona cercana al quiebre o transición de la curva de recompresión (o recarga) a la virgen, debe estar la máxima presión que el suelo ha soportado antes del desarrollo de ese ciclo de carga. Esta presión representa la máxima que ha soportado en toda su historia geológica y se denomina carga de preconsolidación y juega un papel importante en las aplicaciones de la Mecánica de Suelos.

La transición del tramo de recompresión a la virgen no es brusca, es gradual y no se puede determinar a simple vista la presión con la que el segundo tramo comienza, por ello el Doctor A. Casagrande desarrolló un procedimiento empírico para la determinación de la carga de preconsolidación (P_c) *Figura 4.3*.

Obtenida la curva de compresibilidad se debe determinar, el punto de máxima curvatura B en la zona de transición entre las ramas de recompresión y virgen, en ese mismo punto trazar una horizontal D y la tangente a la curva C.

Trazar la bisectriz entre el ángulo formado por C y D, posteriormente prolongar la tangente de la rama virgen hacia arriba hasta interceptar con la bisectriz, ese punto de intersección tiene como abscisa la carga de preconsolidación (P_c) del suelo.

Curva de Compresibilidad.

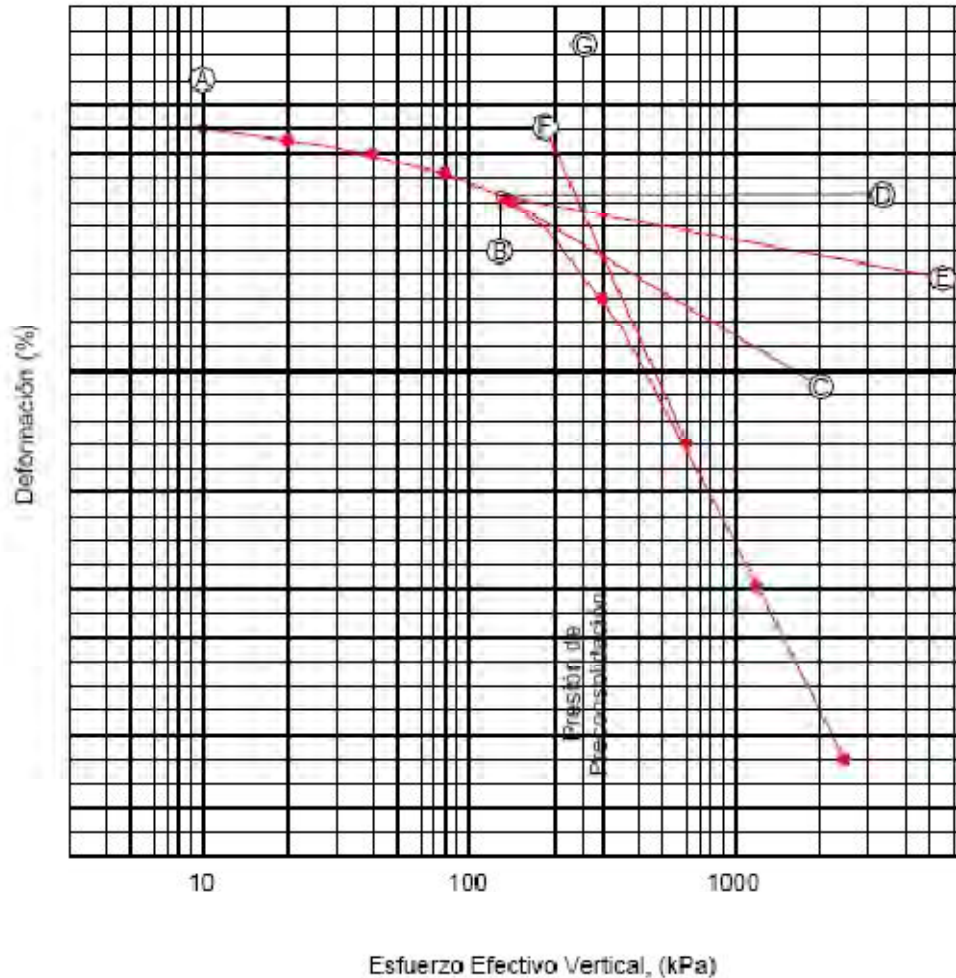


Figura 4.3 Evaluación de la carga de preconsolidación por el método de Casagrande (ASTM D2435-96).

Donde:

- A=Punto de la curva de recarga.
- B= Punto de máxima curvatura.
- C=Tangente a la curva del punto B.
- D=Línea horizontal a través de B.
- E=Bisectriz entre C y D.
- F=Tangente de la rama virgen.
- G=Intersección de E y F (Presión de preconsolidación).

Terminología.

Consolidación: es un proceso de disminución de volumen que se produce en un lapso de tiempo y que es debido a un incremento de las cargas sobre el suelo.

Clases de consolidación: Primaria y secundaria.

Consolidación Primaria: Cargado el suelo, la reducción de volumen se debe a la expulsión del agua, fenómeno en el que se transfiere la carga soportada por el agua al esqueleto mineral.

Consolidación Secundaria: Esta consolidación se da por reajuste del suelo y luego de que la carga está casi toda soportada por éste y no por el agua (CNA, 1990).

Grado de consolidación o porcentaje de consolidación: La relación entre la consolidación que ya ha tenido lugar a esa profundidad y la consolidación total que ha de producirse bajo el incremento de carga impuesto, se representa por U (%).

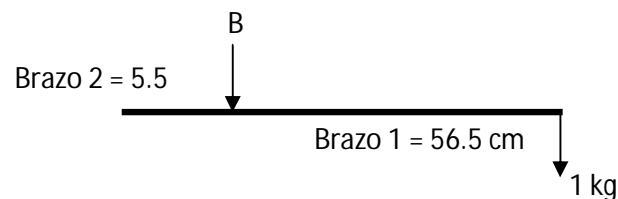
Uso y significado.

Esta prueba se realiza principalmente en arcillas y se obtienen algunos parámetros, con los que se calculan los asentamientos que puede tener un suelo y el tiempo en que estos se producirán.

Cálculos.

Determinación del factor de carga: Medir los brazos de palanca del consolidómetro para sacar su momento correspondiente.

Ejemplo:



Entonces:

$$\text{Momento 1 } 56.5\text{cm} \times 1\text{kg} = 56.5 \text{ kg-cm} \quad ; \quad \text{Momento 2 } 5.5\text{cm} \times B = 5.5B$$

Iguales:

$$56.5 \text{ kg-cm} = 5.5B \quad \text{despejando B} \quad B = 56.5 \text{ kg-cm} / 5.5\text{cm} \quad B = 10.27 \text{ kg}$$

La carga real que actúa sobre el espécimen de suelo es entonces el factor por la carga aplicada.

El espesor de la muestra varía dependiendo de la deformación del mismo. Se deduce mediante la altura del anillo (que representa la altura de la muestra sin deformación) menos el valor de la deformación acumulada en ese rango.

El volumen de la muestra de suelo (V_m) se determina: El área del anillo por el espesor de la muestra de suelo.

Para determina el peso de los sólidos y el vacio de los sólidos se emplean las siguientes ecuaciones.

$$W_s = \frac{W_m}{W+1} \dots\dots\dots (4-1)$$

$$V_s = \frac{W_s}{G_s} \dots\dots\dots (4-2)$$

El Volumen de vacios (V_v) se determina restando el volumen de sólidos del espécimen.

La presión ejercida sobre la muestra de suelo se deduce haciendo la relación de la carga que actúa en la cazuela entre el área del anillo.

De la prueba de consolidación se obtienen los siguientes coeficientes:

El coeficiente de compresibilidad (a_v): Representa la relación deformación-esfuerzo del suelo, sin tomar en cuenta el tiempo y que geoméricamente es igual a la pendiente de la curva de compresibilidad, se obtiene mediante la ecuación (4-3).

$$a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta p} = \frac{e_2 - e_1}{p_2 - p_1} \dots\dots\dots (4-3)$$

Donde:

a_v = Coeficiente de compresibilidad (cm^2/kg).

e_1 y p_1 = Relación de vacíos y presión.

e_2 y p_2 = Relación de vacíos y presión.

El coeficiente de consolidación (C_v): Representa la relación teórica establecida para simplificar la ecuación diferencial del proceso de consolidación y se obtiene mediante la ecuación (4-4).

$$C_v = \frac{0.197 H^2}{t_{50}} \dots\dots\dots (4-4)$$

Donde:

C_v = Coeficiente de consolidación ($cm^2/seg.$).

H^2 = Longitud de la trayectoria del dren más corta (cm). *Figura 4.4.*

t_{50} = tiempo correspondiente al 50% de consolidación primaria para el incremento de carga considerado (seg.).

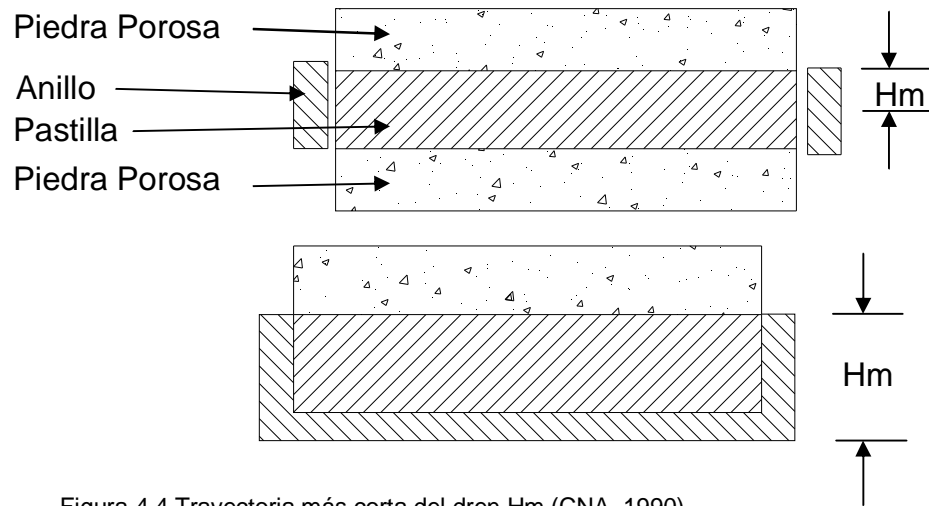


Figura 4.4 Trayectoria más corta del dren Hm (CNA, 1990).

El módulo de compresibilidad es para determinar el grado del asentamiento y se obtiene con la ecuación (4-5).

$$mv = \frac{av}{1+eo} \dots\dots\dots (4-5)$$

Donde:

a_v = Coeficiente de compresibilidad (cm^2/kg).

e_o =Relación de vacíos inicial.

mv = Módulo de compresibilidad (cm^2/kg).

El coeficiente de permeabilidad puede ser calculado con la ecuación (4-6).

$$k = Cv mv \gamma_w \dots\dots\dots (4-6)$$

Donde:

C_v = Coeficiente de consolidación ($cm^2/seg.$).

mv = Módulo de compresibilidad (cm^2/kg).

γ_w = Peso específico del agua (kg/cm^3).

k =Coeficiente de permeabilidad ($cm/seg.$).

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 12

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“CONSOLIDACIÓN”.

Práctica No. 12

Consolidación.

Objetivo: Determinar el decremento de volumen de una muestra inalterada de arcilla y la velocidad con que este decremento se produce.

Herramienta y Equipo.

- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Consolidómetro incluye anillo, micrómetro, piedras porosas.
- Cápsulas de porcelana.
- Cronómetro.
- Pesas.
- Flexómetro.
- Vernier.
- Cortador para labrar la muestra.
- Horno de convección a una temperatura de $105\pm^{\circ}\text{C}$.
- Cuchillo de bolsillo o una espátula pequeña de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho con punta redonda.
- Torno de labrado.



Figura 4.5 Consolidómetro.

Material.

- Muestra de suelo.
- Agua destilada.
- Papel filtro.

Procedimiento.

- 1.-Determinar el diámetro y la altura del anillo de consolidación, con ayuda del Vernier. Posteriormente su área.
- 2.-Determinar el peso del anillo (W_{anillo}) y calcular su volumen, cabe señalar que el volumen obtenido del anillo será igual al del suelo introducido en el mismo antes de ejercer presión (V_m).
- 3.-Colocar el anillo en la muestra inalterada, girar y presionar para que el material se introduzca en el anillo. Posteriormente cortar la muestra con el cortador hasta obtener las dimensiones correctas (*Figura 4.6*) y enrasar hasta obtener una superficie lisa.



Figura 4.6 Obtención de la muestra.

- 4.-Determinar el peso del anillo con la muestra de suelo ($W_{\text{anillo}} + \text{Suelo}$).



Figura 4.7 Determinación del peso del anillo con la muestra de suelo.

- 5.-Tomar una porción de suelo sobrante e introducirla en una cápsula de porcelana de peso conocido y determinar su peso ($W_{\text{cáp}} + S_h$).



Figura 4.8 Determinación del peso de la muestra.

- 6.-Colocar la cápsula con la muestra en el horno por aproximadamente 18 horas. Retirar la muestra y determinar su peso ($W_{cáp+Ss}$). Determinar su contenido de agua.
- 7.-Determinar la longitud de los brazos de palanca y determinar el factor de carga.
- 8.-Colocar el papel filtro sobre las caras libres del material introducido en el anillo.
- 9.-Colocar las piedras porosas en la parte superior e inferior del anillo. Llevar el anillo a la cazuela de consolidación.
- 10.-Colocar la cazuela en el consolidómetro, agregar agua a la cazuela de tiempo en tiempo sin dejar que el nivel baje del borde superior del anillo.
- 11.-Ajustar la elevación de la pieza transversal del marco de carga, hasta que el marco este en contacto con la esfera metálica, alojada en la muesca de la placa de carga (un pequeño peso que actúe sobre el marco de carga hará un contacto estable) previamente colocada sobre la piedra porosa superior.
- 12.-Colocar el micrómetro en el puente que lo sostiene, así mismo debe hacer contacto con el marco de carga y ponerlo en ceros.
- 13.-Retirar el pequeño peso del marco de carga y colocar cuidadosamente el primer incremento de carga en la ménsula. El primer peso debe ser de aproximadamente 500 gr.
- 14.-Activar el cronómetro, observar y registrar las lecturas del micrómetro en los intervalos de tiempo de la siguiente secuencia: 6, 15 y 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos, 1, 2, 4, 8 y 24 horas.
- 15.-Dibujar la curva de consolidación en el eje de las ordenadas la deformación en milímetros y en las abscisas el tiempo en minutos en escala semilogarítmica. La gráfica debe contener la carga (gr.) y presión (Pa) ejercida sobre la muestra así como el día.
Figura 4.1.
- 16.-Incrementar el doble de la carga y repetir los pasos 14 y 15. Así sucesivamente hasta completar el ciclo de carga.
- 17.- Una vez completada la carga, se procede a realizar la descarga y se efectúa en forma inversa a la carga. Retirar la mitad de la carga máxima aplicada y repetir el paso 14.
- 18.- Retirar la mitad de la carga y repetir nuevamente el paso 14, así sucesivamente hasta obtener una presión nula sobre la pastilla. Registrar las lecturas.
- 19.- Dejar la pastilla en el consolidómetro hasta observar la recuperación de la muestra. Es la pequeña diferencia de lecturas del micrómetro.
- 20.- Retirar cuidadosamente los aparatos y la cazuela del consolidómetro, extraer el anillo con la muestra consolidada y determinar su peso.

21.- Retirar la pastilla del anillo y colocarla en una cápsula de porcelana de peso conocido e introducirla al horno por aproximadamente 18 horas.

22.- Retirar la muestra del horno y determinar su peso a temperatura ambiente.

23.- Realizar los cálculos necesarios para obtener la relación de vacíos y la presión ejercida sobre la pastilla en las diferentes cargas. Los cuales se mencionan en la teoría de la prueba.

24.- Construir la curva de compresibilidad, se grafica en el eje de las ordenadas la relación de vacíos en escala aritmética y en el eje de las abscisas la presión (kg/cm^2) en escala logarítmica. *Figura 4.2.*

25.- Determinar la carga de preconsolidación *Figura 4.3.*

26.- Determinar los coeficientes de compresibilidad y de consolidación con ayuda de las ecuaciones (4-3) y (4-4).

27.- Determinar el módulo de compresibilidad y el coeficiente de permeabilidad con las ecuaciones (4-5) y (4-6).

28.- Determinar el peso volumétrico, contenido de agua y la densidad de sólidos de la muestra.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

3.8. PERMEABILIDAD (ASTM D2435-00).

Objetivo: Determinar el coeficiente de permeabilidad k para un flujo laminar de agua a través de una masa de suelo, por los métodos de carga constante y carga variable.

Introducción.

Para el estudio de las propiedades hidráulicas del suelo, se investiga el movimiento del agua libre entre las partículas, cuya magnitud depende de la permeabilidad del material. Se define un material permeable como aquel que tiene vacíos continuos. Bajo este concepto, todos los suelos son permeables.

El flujo de agua a través de medios porosos, como lo es el suelo, está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Henry Darcy en 1856. Darcy investigó las características del flujo de agua a través de filtros, formados por materiales térreos, lo cual facilitó la aplicación de los resultados de su investigación a la Mecánica de Suelos.

En las ecuaciones de la ley de Darcy, aparece una constante física de proporcionalidad, k , llamada el Coeficiente de Permeabilidad y sus unidades corresponden a una velocidad. Esto se ha utilizado para definir en términos simples el coeficiente de permeabilidad de un suelo como la velocidad del agua a través del mismo, cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario. El valor de k indica la mayor o menor facilidad con que el agua fluye a través del suelo, estando sujeta a un gradiente hidráulico dado (Juárez, 1982).

Darcy encontró que para velocidades suficientemente pequeñas, el gasto (caudal) queda expresado por:

$$Q = kiA \dots\dots\dots (4-7)$$

Donde:

Q = Gasto que pasa a través de la muestra (cm^3/seg).

k =Coeficiente de permeabilidad (cm/seg).

i = Gradiente hidráulico (m/m) mostrado en la parte de cálculos.

A =Área de la sección transversal de la muestra (cm^2).

La ecuación de continuidad del gasto establece:

$$Q = Av \dots\dots\dots (4-8)$$

Donde:

A =Área de la sección transversal de la muestra (cm^2).

v = Velocidad del flujo (cm/seg).

La velocidad de descarga se determina a partir de las ecuaciones (4-7) y (4-8) como:

$$v = ki \dots\dots\dots (4-9)$$

Donde:

v= Velocidad del flujo o descarga (cm/seg).

k=Coficiente de permeabilidad (cm/seg).

i= Gradiente hidráulico.

La velocidad del flujo es directamente proporcional al gradiente hidráulico; esto indica que, dentro del campo de aplicabilidad de la ley de Darcy, el flujo en el suelo es laminar (Juárez, 1982).

El gradiente hidráulico se determina con la ecuación (4-10), que es necesario para la determinación de la velocidad de descarga mostrada en la ecuación (4-9).

$$i = \frac{h}{L} \dots\dots\dots (4-10)$$

La velocidad v_1 de la ecuación (4-11), toma en cuenta la existencia de la fase sólida impermeable y se le llama velocidad de filtración y es la velocidad media de avance del agua en la dirección del flujo.

$$v_1 = \frac{1+e}{e} v \dots\dots\dots (4-11)$$

Donde:

e=Relación de vacíos.

v=Velocidad de descarga (cm/seg.).

3.8.1. Permeámetro de carga constante.

Está destinado a materiales de alta permeabilidad, como son los suelos granulares (arena, grava, o combinación de ellas).

La Figura 4.9 muestra un elemento de suelo de área transversal A y longitud L confinado entre un tubo transparente y dos piedras porosas artificiales que no deben ofrecer mayor dificultad al paso del agua que la muestra. Se somete al suelo a una carga hidráulica constante h, valiéndose de una fuente que suministra el agua de consumo y de un conducto o vertedero que elimina el excedente.

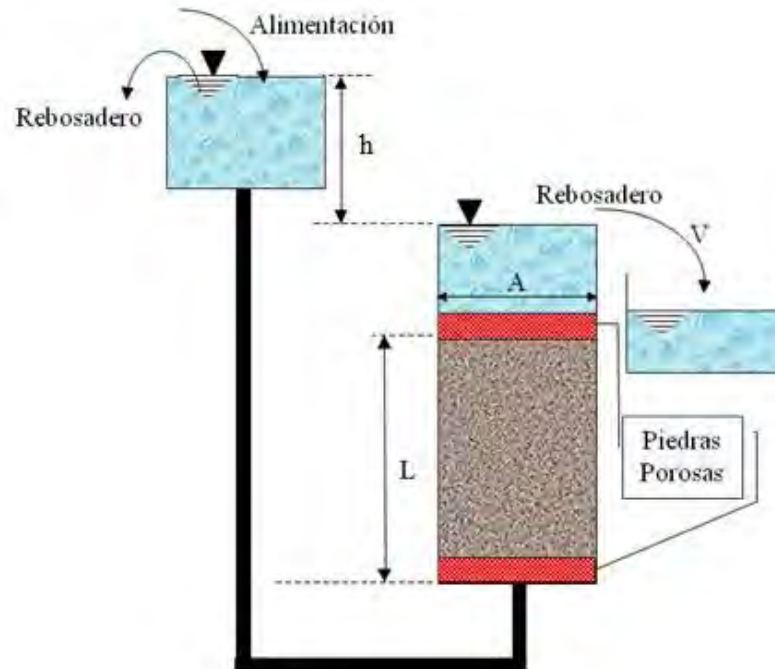


Figura 4.9 Esquema del representativo del permeámetro de carga constante.

Es conveniente aclarar que el agua que se usa debe desaerarse y dejarla circular el tiempo suficiente por el espécimen, hasta notar a través del cuerpo principal transparente del equipo, que no hay burbujas de aire. Cuando éstas desaparezcan, se está en condición de hacer las mediciones. Con un cronómetro listo y a un tiempo arbitrario se mide el volumen de agua de descarga en una probeta, manteniendo fijo el nivel h. Con los datos del tiempo y el volumen de agua de descarga, se determina el caudal con la ecuación (4-12):

$$Q = \frac{v}{t} \dots\dots\dots (4-12)$$

3.8.2. Permeámetro de carga variable.

Este procedimiento se usa en materiales predominantemente finos como son los suelos arcillosos.

En la Figura 4.10 se ilustra una muestra de suelo limitada por dos piedras porosas de permeabilidad mayor que la de la muestra y del mismo diámetro. En la parte superior tiene un receptáculo al cual se le ha acoplado un delgado tubo transparente de área transversal a . Para saturar el espécimen, se deja pasar agua a través de una válvula. El agua empieza a ascender hasta alcanzar un nivel h_1 del tubo piezométrico, al alcanzar el dicho nivel se cierra la válvula.

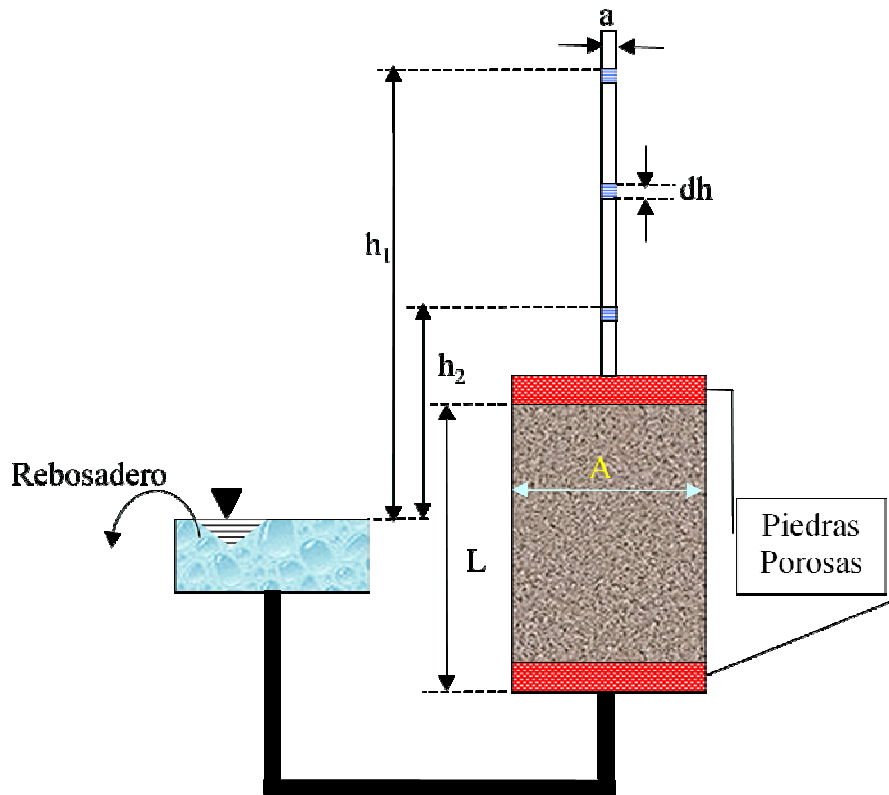


Figura 4.10 Esquema del representativo del permeámetro de carga variable.

La muestra debe estar completamente saturada y desaerada, proceso que requiere mucho tiempo en materiales arcillosos.

Aun cuando cesa el suministro de agua continúa su salida por el orificio de descarga, lo cual provoca el descenso del nivel en el tubo. El agua sobrante se recoge en una bandeja provista. Como la descarga de agua es mínima, no medir el volumen de agua como en el método anterior, en este caso determinar el tiempo transcurrido en descender el nivel de agua en el tubo transparente de h_1 a h_2 .

Terminología.

Flujo laminar: Es aquel en el cual las partículas de agua se mueven o desplazan sin interferencias, esto quiere decir que las partículas no chocan entre sí. Es característico de los limos y las arcillas, pero puede ocurrir en las arenas bajo ciertas condiciones hidráulicas.

Flujo turbulento: Cuando las líneas de flujo se juntan debido al choque de las partículas de agua que se mueven indisciplinadamente. Es propio de las gravas.

Uso y significado.

Métodos directos: Su principal objetivo es la determinación del coeficiente de permeabilidad.

Pueden dividirse en:

a) Ensayos de laboratorio:

Permeámetro de carga constante: para suelos de alta permeabilidad, como arenas y gravas.

Permeámetro de carga variable: para suelos de mediana permeabilidad a baja permeabilidad, como limos y arcillas.

b) Ensayos de campo.

Métodos indirectos: Tienen como finalidad principal la determinación de algún otro parámetro o propiedad del suelo y se los utiliza cuando es imposible aplicar algún método directo o como verificación. Se halla el valor del coeficiente de permeabilidad a partir de la curva granulométrica, del ensayo de consolidación, de la prueba horizontal de capilaridad y otros.

Cálculos.

Para calcular el coeficiente de permeabilidad k por carga constante se utiliza la siguiente ecuación:

$$kT = \frac{V L}{A h t} \dots\dots\dots (4-13)$$

Donde:

L= Altura de la muestra (cm).

A= Área de la muestra (cm^2).

h= Diferencia de carga hidráulica (cm).

V= Volumen de agua medido (cm^3).

t= Tiempo transcurrido del ensayo (seg).

kT=Coeficiente de permeabilidad (cm/seg).

Para el cálculo del coeficiente de permeabilidad k por carga variable se utiliza la ecuación:

$$kT = \frac{aL}{A t} \ln \frac{h_1}{h_2} \dots\dots\dots (4-14)$$

Donde:

a = Área del tubo vertical de carga (cm^2).

A = Área de la muestra (cm^2).

L = Longitud de la muestra (cm).

h1 = Carga hidráulica al principio de la prueba (cm).

h2 = Carga hidráulica al final de la prueba (cm).

t = Tiempo requerido para que la carga hidráulica pase de h1 a h2 (seg).

Existe una corrección del coeficiente k por temperatura y se muestra en la siguiente ecuación:

$$k_{20^\circ} = kT \frac{\mu_T}{\mu_{20^\circ}} \dots\dots\dots (4-15)$$

Donde:

kT= Coeficiente de permeabilidad (cm/seg).

μ_T = Viscosidad dinámica del agua T°C.

μ_{20} = Viscosidad dinámica del agua a 20°C.

k₂₀=Coeficiente de permeabilidad a 20°C.

Los valores de las viscosidades y sus relaciones se muestran en la *tabla 4.1*. En un intervalo de 10° a 30°C o si se prefiere la gráfica de relación de viscosidades dinámica con la temperatura *Figura 4.11*.

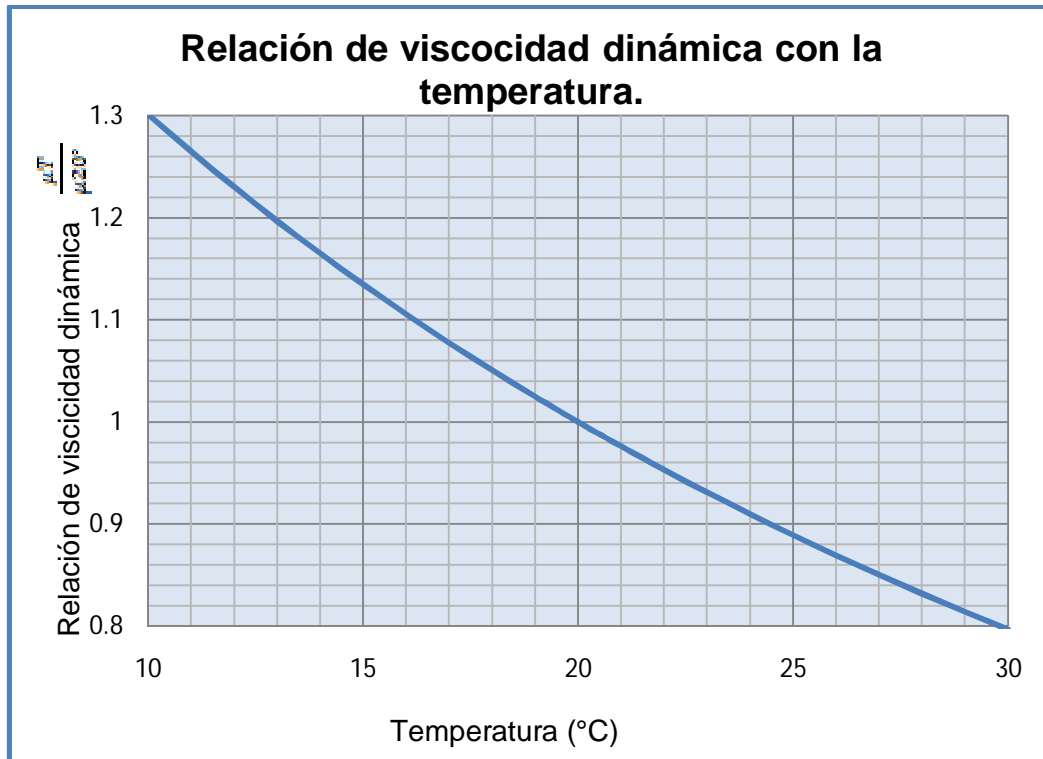


Figura 4.11 Gráfica de Viscosidad vs Temperatura (CNA, 1990).

Tabla 4.1 Viscosidades del agua (CNA, 1990).

**VISCOSIDADES DEL AGUA DE 10° A 30°C
Y RELACIONES**

Grados (°C)	μ_T	$\frac{\mu_T}{\mu_{20^\circ}}$
10	1.3077	1.30119
11	1.2713	1.26497
12	1.2363	1.23014
13	1.2028	1.19681
14	1.1709	1.16507
15	1.1404	1.13472
16	1.1111	1.10557
17	1.0828	1.07741
18	1.0559	1.05064
19	1.0299	1.02477
20	1.0050	1.00000
20.2	1.0000	0.99502
21	0.9810	0.97611
22	0.9579	0.95313
23	0.9358	0.93114
24	0.9142	0.90965
25	0.8937	0.88925
26	0.8737	0.86935
27	0.8545	0.85024
28	0.8360	0.83184
29	0.8180	0.81397
30	0.8007	0.79671

μ_T = Viscosidad del agua a T°C.
 μ_{20} = Viscosidad del agua a 20°C.

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 13

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

“PERMEABILIDAD”

CARGA VARIABLE Y CARGA CONSTANTE.

Práctica No. 13

Permeámetro con carga constante.

Objetivo: Determinar el coeficiente de permeabilidad k mediante la utilización del permeámetro de carga constante, para un flujo laminar a través de un suelo granular (arenas y gravas).

Herramienta y Equipo.

- Permeámetro de carga constante (de lucita).
- Termómetro con un rango de 0 a 50°C y aproximación de 0.1°C.
- Piezómetro.
- Válvula.
- Cronómetro
- Tanque alimentador.
- Tubo alimentador.
- Vernier.
- Pistón metálico de 4 cm de diámetro y 300 gr. de peso
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Recipiente metálico circular de 20 cm de diámetro.
- Cápsula de porcelana.



Figura 4.12 Permeámetro.

Material.

- Agua destilada.
- Muestra de suelo.

Procedimiento.

1.- Determinar el diámetro promedio del permeámetro con ayuda del vernier y determinar su área transversal.

- 2.- Colocar la piedra porosa en el extremo inferior del permeámetro y determinar su peso. Registrar como peso de la tara.
- 3.- Colocar el material previamente seco en el permeámetro por capas de aproximadamente 1 cm de espesor, apisonándolas con un número variable de golpes del pistón, a fin de que la muestra quede compactada en todo su espesor.
- 4.- Determinar el peso del permeámetro con la muestra de suelo compactada. Registrar como peso de la tara más la muestra seca.
- 5.- Saturar el permeámetro por capilaridad, sumergirlo lentamente en un recipiente de agua destilada y procurar que el nivel de la línea de saturación, quede arriba del nivel de agua del recipiente, con objeto de que la expulsión del aire sea más efectiva.
- 6.- Colocar la piedra porosa en la parte superior del permeámetro, así mismo taparlo y atornillarlo.
- 7.- Colocar el permeámetro en posición de prueba y agregar agua hasta derramar, conectarlo con el sistema de abastecimiento y dar un gradiente menor que 4 para evitar la canalización y el boiling que consiste en poner las partículas en suspensión.
- 8.- Dejar escurrir el agua por aproximadamente 15 minutos a fin de establecer un gasto constante y así poder realizar las mediciones.
- 9.- Determinar la longitud de la muestra (L) a través del cilindro transparente.
- 10.- Ajustar la válvula de la toma de corriente y la presión de agua del tanque del suministro, para obtener la altura de agua deseada (H). Mientras el agua fluye a una proporción firme y los niveles del piezómetro son constantes, colocar el agua que sale en un recipiente. Mida la temperatura del agua y el peso del agua recolectada para determinar su volumen en un determinado tiempo puede ser 1 o 2 minutos.
- 11.- Registrar el volumen de agua recogido en cm³ y repetir los pasos 10 y 11 varias veces para obtener un promedio, hasta encontrar una concordancia satisfactoria de los resultados.
- 12.- Retirar el permeámetro y determinar su peso con la muestra de suelo. Registrar como peso de la tara más la muestra húmeda, introducir la muestra al horno para su secado.
- 13.- Determinar el coeficiente de permeabilidad k con ayuda de la ecuación (4-13) y su corrección por temperatura con la ecuación (4-15).
- 14.- Determinar el gradiente hidráulico, la velocidad de descarga y de filtración con ayuda de las ecuaciones (4-9), (4-10) y (4-11).

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

Permeámetro con carga variable.

Objetivo: Determinar el coeficiente de permeabilidad k de un suelo fino (limos y arcillas) mediante la utilización del permeámetro de carga variable.

Herramienta y Equipo.

- Permeámetro de carga variable.
- Termómetro graduado de 0° a 50°C con divisiones de 0.1°C .
- Piezómetros.
- Válvulas.
- Cronómetro.
- Tanque alimentador.
- Tubo alimentador.
- Vernier.
- Pistón metálico de 4 cm de diámetro y 300 gr. de peso.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Recipiente metálico circular de 20 cm de diámetro.
- Cápsula de porcelana.

Material.

- Muestra de Suelo.
- Agua destilada.

Procedimiento.

- 1.- Seguir los pasos del 1 al 7 del procedimiento de permeabilidad de carga constante.
- 2.- Determinar la longitud de la muestra (L) a través del cilindro transparente.
- 3.- Determinar el área (a) del tubo vertical de carga.
- 4.- Dejar escurrir el agua a fin de saturar el material y así poder realizar las mediciones.
- 5.-Fijar tres marcas en el piezómetro y determinar cuidadosamente sus distancias al nivel libre del agua en el recipiente. Las distancias entre las marcas varían de 10 a 40 cm, dependen de la permeabilidad del material.
- 6.- Para empezar a tomar las lecturas, se deja llenar el piezómetro un poco más arriba de la primera marca y se hace fluir el agua. Echar andar el cronómetro.
- 7.- Determinar el tiempo t y la temperatura T , cuando la el nivel del agua pase por la primera marca h_1 .
- 8.- Esperar a que nuevamente el nivel del agua pase por la segunda marca h y realizar las mediciones correspondientes. Así sucesivamente.

9.- Repetir las determinaciones tantas veces sea necesario para obtener un valor más o menos constante de la permeabilidad.

10.- Retirar el permeámetro y determinar su peso con la muestra de suelo. Registrar como peso de la tara más la muestra húmeda, introducir la muestra al horno para su secado.

11.- Determinar el coeficiente de permeabilidad k con ayuda de la ecuación (4-14) y su corrección por temperatura con la ecuación (4-15).

12.- Determinar el gradiente hidráulico, la velocidad de descarga y de filtración con ayuda de las ecuaciones (4-9), (4-10) y (4-11).

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

4.1. COMPRESIÓN SIMPLE (ASTM D2166-98).

Objetivo: Obtener el valor de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo (S_u) y su módulo de elasticidad (E_s).

Introducción.

Esta prueba no es considerada realmente una prueba triaxial y por consiguiente no se clasifica como tal, aunque en muchos aspectos es parecida a una prueba rápida. Se realiza con la aplicación de un esfuerzo axial a un espécimen de suelo, pero sin la presión de confinamiento. Prácticamente sólo existe la etapa de carga, que conduce el suelo a la falla; sin embargo, podría considerarse como primera etapa el estado inicial de la muestra, sin esfuerzos exteriores.

En esta primera etapa los esfuerzos totales son nulos y el agua adquiere teóricamente un esfuerzo de magnitud igual a la presión de consolidación (γz) que el suelo tenía en la naturaleza. Este esfuerzo del agua comunica a la estructura sólida los esfuerzos efectivos necesarios para que la muestra mantenga su volumen *Figura 4.13*.

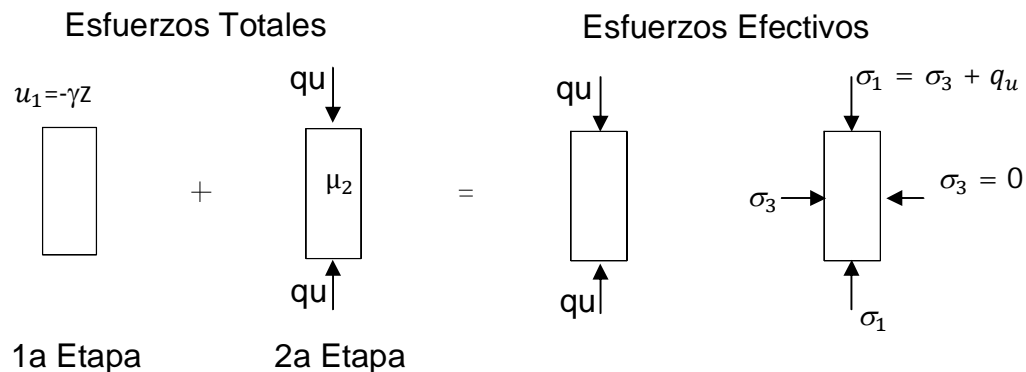


Figura 4.13 Distribución de esfuerzos totales y efectivos en la prueba de compresión simple (Juárez, 1982).

En la segunda etapa la muestra se lleva a la falla con la aplicación del esfuerzo axial (σ_1), que mide su resistencia en este tipo de prueba, a la vez origina una presión neutral adicional u_2 .

La prueba queda circunscrita a suelos cohesivos, pues en las arenas y suelos arenosos no es posible el labrado de las muestras (Juárez, 1982).

Terminología.

Resistencia a la compresión no confinada (qu): Se determina a partir de muestras cilíndricas de suelo, las cuales se fallan sin ningún confinamiento lateral. En esta prueba la resistencia a la compresión no confinada se considera como la carga máxima alcanzada por unidad de área o como la carga por unidad de área bajo una deformación axial del 15%, lo que se fije primero durante la ejecución de la prueba.

Resistencia al corte (Su): Se determina como la mitad de la resistencia a la compresión no confinada a la falla, definido este último en el párrafo anterior.

Sistema de compresión: Para suelos con una resistencia a la compresión no confinada menor a 100kPa el sistema de compresión debe ser capaz de medir el esfuerzo de compresión a cada 1kPa. Para suelos con una resistencia a la compresión no confinada igual o mayor a 100kPa el sistema de compresión debe ser capaz de medir el esfuerzo de compresión a cada 5kPa.

Micrómetro: El indicador de desplazamiento debe ser un comparador de carátula graduado a 0.02 mm, y con un rango de medición de por lo menos un 20% de la longitud del espécimen para el ensayo, o algún otro instrumento de medición, como un transductor que cumpla estos requerimientos.

Mide las dimensiones físicas del espécimen dentro del 0.1% de la dimensión medida.

Cronómetro: Instrumento de medición del tiempo. Debe tener una precisión de 1s para controlar la velocidad de aplicación de la deformación.

Balanza: Determina la masa de los especímenes con una precisión de 0.1% de su masa total.

Equipo misceláneo: Incluye las herramientas para recortar y labrar la muestra.

Uso y significado.

El principal propósito de esta prueba es la de obtener en forma rápida la resistencia a la compresión no confinada del suelo. Este debe tener suficiente cohesión para permitir ensayar la muestra en un estado no confinado.

Se utiliza en muestras de suelo que tengan estructura fisurada, muestras con algún tipo de suelo loessico, suelos secos, o muestras que contengan una porción importante de arena, limo o ambos; y que frecuentemente muestren una resistencia al corte elevada en las pruebas tipo no consolidada no drenada. Se incluyen los suelos parcialmente saturados, mismos que muestran diferentes resistencias cuando se fallan en pruebas no consolidadas no drenadas.

Pruebas

4.1.1. Torcómetro.

Este dispositivo permite al operador, determinar rápidamente en forma aproximada el esfuerzo cortante de suelos cohesivos. El uso es simple, elimina la preparación de la muestra y requiere sólo 2" de diámetro mínimo de la superficie.

El torcómetro no reemplaza el análisis de las pruebas realizadas en campo y en el laboratorio. Su uso es exclusivo para suelos cohesivos totalmente saturados, cuya compresión no drenada es independiente del esfuerzo normal (ELE International).

El dispositivo tiene un rango de esfuerzo de 0 a 2.5 kg/cm^2 (tons/ft^2), el rango de torsión puede aplicarse fácilmente en forma manual. La cabeza está provista con un mecanismo que indica la lectura máxima después de la prueba. La aproximación es de 0.1 kg/cm^2 , y permite una interpolación visual de 0.05 kg/cm^2 (ELE International).

El instrumento se compone con 3 veletas intercambiables, un resorte de torsión y una perilla con una carátula indicadora, todos ellos unidos por un eje metálico *Figura 4.14*



Figura 4.14 Torcómetro.

Aplicaciones.

Aplicaciones sugeridas para la evaluación de la fuerza de cizallamiento:

- a) Tubo Shelby.
- b) Penetración estándar.
- c) Split cuchara.
- d) Muestras de pozos de prueba y excavaciones.
- e) En las paredes de los pozos y trincheras.

Procedimiento de ensaye.

1.- Tomar un tubo Shelby que contenga en el interior una muestra de suelo (no debe ser extraída para conservar su confinamiento) *Figura 4.15*.



Figura 4.15 Muestra de suelo con tubo Shelby.

2.- Determinar el tipo de veleta a usar (Figura 4.16). A continuación se explica.

Veleta normal (Diámetro de 1" (25.4mm), rango de 0 a 1 kg/cm²): Se utiliza para suelos cohesivos totalmente saturados con una compresión no drenada independiente de presión normal. El rango de esfuerzo permite ser usado para diferentes consistencias en las arcillas de muy suave a tieso.

Veleta sensible (Diámetro de 1 7/8" (47.6mm), rango de 0 a 0.2 kg/cm²): Para muestras remoldeadas.

Veleta de capacidad alta (Diámetro de 3/4" (19mm), rango de 0 a 2.5 kg/cm²): Para arcillas rígidas.



Figura 4.16 Veletas.

3.- Poner el torcómetro en ceros, donde este debe coincidir con el índice de la cabeza *Figura 4.17*. Si no coincide, gire la cabeza con la yema de los dedos en dirección al sentido de las agujas del reloj hasta que coincida.



Figura 4.17 Marca en cero.

4.- Presionar el torcómetro verticalmente en la muestra de suelo, lo más alejado posible de las paredes del tubo, de modo que se hunda hasta el tope.

5.- Con la carga vertical constante, aplicar una torsión rápida con sumo cuidado *Figura 4.18*. La proporción de rotación para que se desarrolle la falla, se recomienda llevarlo a cabo de 5 a 10 segundos.



Figura 4.18 Aplicación de la torsión.

6.- En el momento de la falla, el resorte se descarga y en la carátula se muestra la lectura del valor de la resistencia no drenada (S_u).

7.- Multiplicar el valor por el factor, según sea el caso y el resultado es la resistencia no drenada del suelo.

Veleta normal x 1 ; Veleta sensible x 0.2 ; Veleta de capacidad alta x 2.5

Las unidades de medida las indica el torcómetro a emplear.

4.1.2. Penetrómetro de bolsillo.

- 1.- Tomar una muestra de suelo contenida en el interior del tubo Shelby (no debe ser extraída para conservar su confinamiento).
- 2.- Colocar el indicador del penetrómetro en cero *Figura 4.19*.
- 3.- Hincar con presión firme en la muestra de suelo, la punta del penetrómetro hasta la marca indicada por medio de una ranura alrededor del pistón.
- 4.- Leer y registrar el esfuerzo de compresión no drenada, bajo la manga del indicador. La manga del indicador defiende su posición después de que el pistón es soltado.

Para conocer el valor de “cohesión” o de resistencia no drenada (S_u), se debe dividir lo obtenido entre dos.



Figura 4.19 Penetrómetro de bolsillo (ELE International).

Preparación de la muestra.

Tamaño de la muestra. La muestra debe tener un diámetro mínimo de 30mm y las partículas mayores dentro de ésta no deben ser menores al 10% el diámetro de la muestra. Para muestras con diámetro de 72mm o mayor, el tamaño máximo de las partículas deben ser menores que el 6% el diámetro de la muestra. Si al final de la prueba se observa la existencia de partículas, dentro del espécimen, mayores que las permitidas se debe anotar en el informe dichas características. La relación altura - diámetro debe estar entre 2 y 2.5. Se deben tomar tres medidas de la altura del espécimen a cada 120° y tres medidas del diámetro a la mitad de cada cuarto de la altura.

Se debe evitar cualquier cambio del contenido de agua durante la manipulación de los tubos muestreadores y de la muestra ya cortada.

- 1.- Cortar un trozo prismático de la muestra inalterada de aproximadamente 5x5x12 cm.
- 2.- Colocar la probeta en el torno vertical.
- 3.- Labrar la probeta cuidadosamente con ayuda del cortador de alambre y la espátula hasta obtener un diámetro uniforme de 3.6 cm *Figura 4.20*.



Figura 4.20 Labrado de la probeta de suelo.

4.- Una vez labrada la probeta, colocarla en el cabeceador y cortar ambos lados de la probeta perpendicularmente a su eje, de tal forma que cuente con 9 cm de longitud *Figura 4.21*.



Figura 4.21 Corte de la probeta en sus extremos con el cabeceador.

5.- Determinar el diámetro inferior, central y superior de la probeta con ayuda del vernier y calcular su diámetro geométrico con el ecuación 4-16.

$$Diám = \frac{Di+2Dc+Ds}{4} \dots\dots\dots (4-16)$$

6.- Determinar la altura promedio de la probeta, realizando mediciones a cada 120°.

Protección de la muestra contra la evaporación.

Aun en pruebas de sólo unos minutos de duración, es conveniente proteger a los especímenes contra la evaporación; para ello existen muchos métodos, algunos de los cuales se mencionan a continuación, ordenados de menor a mayor efectividad: (Juárez, 1982).

1. Envolver la muestra en una toalla de papel húmeda, sin que quede ceñida.
2. Cubrir el espécimen con una capa delgada de grasa.
3. Encerrar el espécimen en una cámara cerrada con agua en el fondo.
4. Cubrir el espécimen con una membrana de hule delgado.
5. Envolver el espécimen con dos membranas de hule y una capa de grasa a prueba de agua entre ellas, sumergiendo el conjunto totalmente en agua.

Cálculos.

Para calcular la deformación axial se presenta la ecuación 4-17.

$$\varepsilon n = \frac{\delta n}{H_0} \dots\dots\dots (4-17)$$

Donde:

δn = Cambio de longitud del espécimen como se lee a partir del indicador de deformaciones (mm).

H_0 = Longitud inicial de la muestra para el ensayo (mm).

Para calcular el área transversal corregida para cada lectura del micrómetro, se tiene la ecuación 4-18.

$$A_c = \frac{A_0}{(1-\varepsilon n)} \dots\dots\dots (4-18)$$

Donde:

A_0 = Área transversal inicial de la muestra (mm^2).

εn = Deformación axial (mm/mm).

Calcular el esfuerzo de compresión con la ecuación 4-19.

$$\sigma_c = \frac{P}{A_c} \dots\dots\dots (4-19)$$

Donde:

P = Carga aplicada (a cada 1kPa).

Graficar la curva esfuerzo de compresión (ordenada) en kg/cm^2 y en kPa – deformación axial (abscisa) en % y seleccionar el valor máximo del *esfuerzo de compresión* o el esfuerzo de compresión para el 15% de deformación axial y reportar este esfuerzo como la *resistencia a la compresión no confinada (qu)* en kg/cm^2 y en kPa. La escala a utilizar en el eje de las abscisas debe ser de 0 a 20%. *Figura 4.22.*

Curva Esfuerzo-Deformación

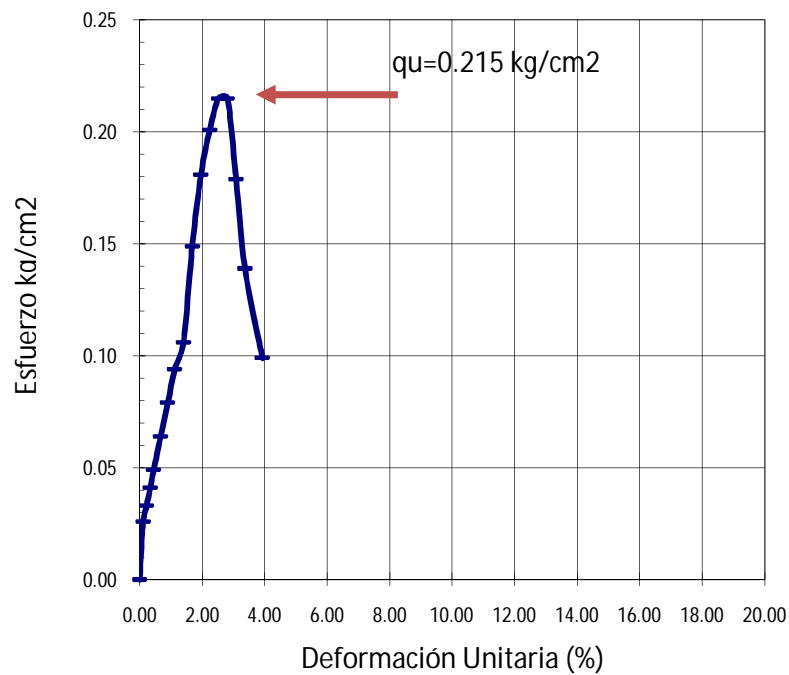


Figura 4.22 Determinación del q_u .

Graficar la curva esfuerzo de compresión (ordenada) en kg/cm^2 y en kPa – deformación axial (abscisa) en mm/mm y determinar la pendiente de la recta que une el punto del origen de la gráfica con el punto máximo del esfuerzo de compresión para obtener el *Modulo Elástico Secante* (E_s) en kg/cm^2 y en kPa . La escala a utilizar en el eje de las abscisas debe ser de 0 a 0.2 *Figura 4.23*.

Graficar el círculo de Mohr y determinar la *resistencia al esfuerzo cortante* (S_u) como $\frac{1}{2}$ de q_u en kg/cm^2 y en kPa *Figura 4.24*.

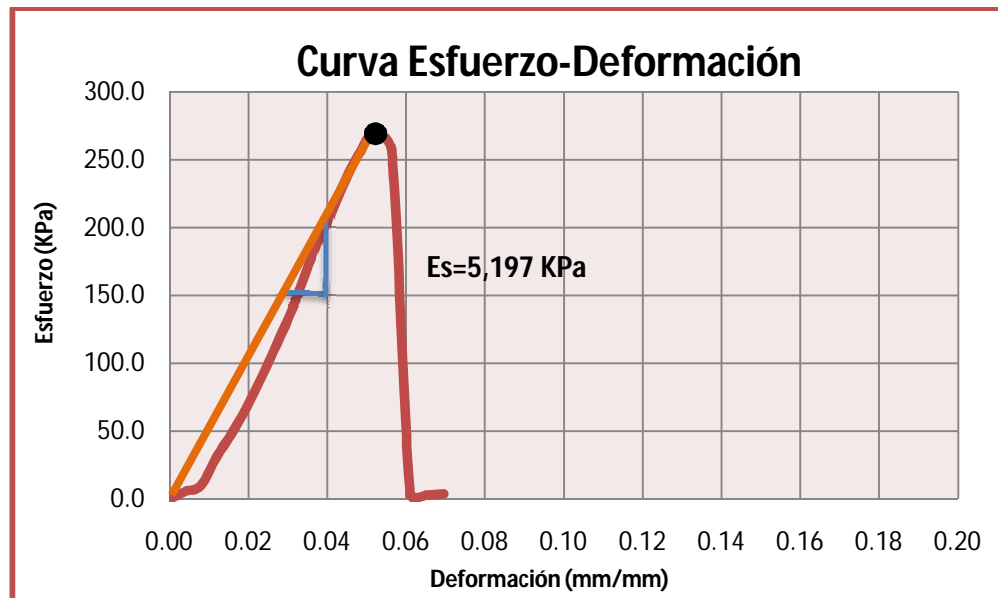


Figura 4.23 Determinación del módulo de elasticidad (E).

En la envolvente de falla de los círculos de Mohr se traza una recta en la gráfica “esfuerzo cortante-esfuerzo normal”, en donde la ordenada al origen de dicha recta, determina a la cohesión y el ángulo de fricción interna es aquel cuya tangente es la pendiente de la recta, con respecto al eje de los esfuerzos normales.

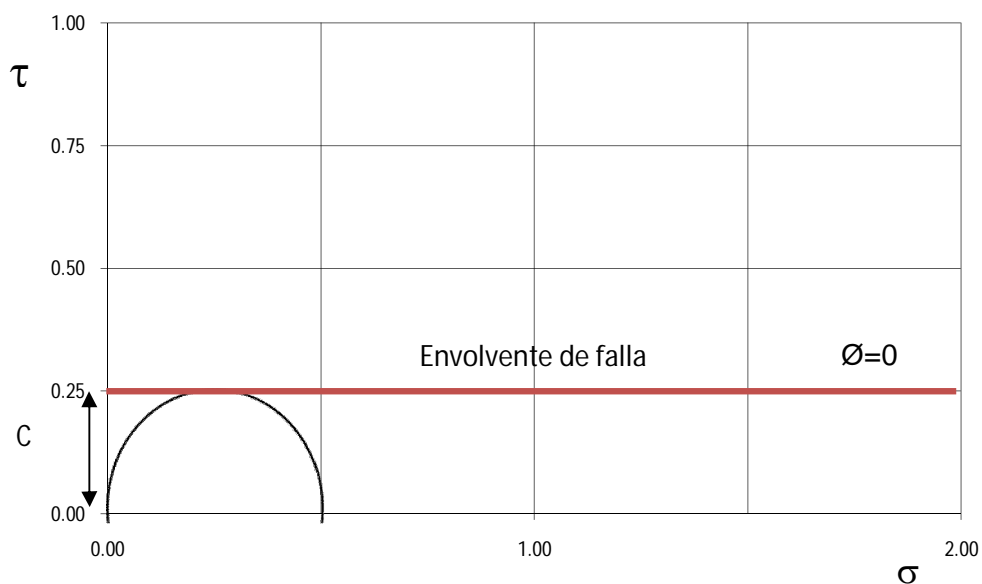


Figura 4.24 Círculo de Mohr y envolvente de falla, para el ensayo de compresión no confinada.

La resistencia de un suelo al esfuerzo cortante, se expresa con la fórmula de Coulomb.

$$S = c + \sigma \tan \emptyset \dots\dots (4-20)$$

Donde:

S= Resistencia al esfuerzo cortante.

c=Cohesión.

σ =Esfuerzo normal.

\emptyset =Ángulo de fricción interna.

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 14

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

“RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE DE LOS SUELOS”.

“COMPRESIÓN SIMPLE”

Práctica No.14

Compresión simple.

Objetivo: Obtener el valor de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo (S_u), así mismo su módulo de elasticidad del material (E_s) por deformación controlada y esfuerzo controlado.

Herramienta y Equipo.

- Marco de carga.
- Anillo de carga con micrómetro.
- Vernier.
- Cronómetro.
- Equipo y herramienta de labrado.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Curva de calibración del anillo.
- Sistema de compresión.
- Micrómetro de deformación.
- Cabeceador.
- Extractor de muestras.
- Cápsulas de porcelana.
- Horno de secado a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Material.

- Muestra de suelo.

Procedimiento (deformación controlada).

1.- Realizar el procedimiento de preparación de la muestra y determinar sus dimensiones mencionadas *Figura 4.25*.



Figura 4.25 Muestra de suelo preparada para la prueba.

2.- Colocar la probeta de suelo en el marco de carga así como el micrómetro y el anillo de carga *Figura 4.26*.



Figura 4.26 Equipo y muestra en posición para el ensayo.

3.- Colocar el micrómetro en ceros (o tomar la lectura inicial y registrar) *Figura 4.27.*



Figura 4.27 Micrómetro con lectura en cero.

4.- Ajustar la velocidad de deformación axial de $\frac{1}{2}$ a 2%/min. La velocidad de deformación debe de escogerse de tal forma que el tiempo de falla no exceda de 15min (los materiales muy suaves se deben fallar con una velocidad de deformación alta, mientras que los materiales frágiles se deben fallar con una velocidad de deformación menor). Indicar la velocidad de la deformación en el reporte.

5.- Aplicar la carga e iniciar el cronómetro.

6.- Anotar la carga, deformación y el tiempo para definir la forma de la curva esfuerzo – deformación, usualmente son suficientes de 10 a 15 puntos *Figura 4.28.*



Figura 4.28 Toma de lecturas de tiempo, deformación y carga.

7.-Continuar con la carga hasta que su valor disminuya y la deformación aumente hasta alcanzar el 15% de la misma, o llevarla hasta la falla *Figura 4.29*.



Figura 4.29 Falla de la probeta de suelo.

8.- Retirar la muestra del aparato y colocarla en una cápsula de porcelana de peso conocido *Figura 4.30*.



Figura 4.30 Muestra de suelo fallada.

9.- Determinar el peso de la muestra de suelo más cápsula *Figura 4.31*. Posteriormente colocar la muestra en el horno hasta su secado y determinar el peso nuevamente.



Figura 4.31 Determinación del peso de la muestra.

- 10.- Determinar el contenido de agua (indicar sí el contenido de agua se obtuvo de los cortes o de la muestra ensayada).
- 11.- Hacer un esquema de la muestra fallada y mostrar la pendiente de falla.
- 12.- Realizar los cálculos para determinar el esfuerzo de compresión del suelo.
- 13.- Graficar el círculo de Mohr y determinar la *resistencia al esfuerzo cortante* (S_u) como $\frac{1}{2}$ de q_u en kg/cm^2 y en kPa.
- 14.- Construir las gráficas de esfuerzo (kPa)-deformación axial (%) y esfuerzo (kPa)--deformación axial (mm/mm).
- 15.- Determinar el módulo de elasticidad del suelo (E_s).

Procedimiento (carga controlada).

- 1.- Realizar hasta el paso 3 del procedimiento anterior.
- 2.- Activar el cronómetro y al mismo tiempo aplicar el primer incremento de carga.
- 3.- Antes de aplicar el nuevo incremento de carga se debe observar y registrar la lectura del micrómetro 5 segundos antes. Cada incremento debe aplicarse durante un minuto.
- 4.- Aplicar el nuevo incremento de carga.
- 5.- Anotar la carga, deformación y el tiempo para definir la forma de la curva esfuerzo – deformación, usualmente son suficientes de 10 a 15 puntos.
- 6.- Observar cuidadosamente la muestra para detectar las posibles planos de falla o grietas.
- 7.- Continuar con la carga hasta que su valor disminuya y la deformación aumente hasta alcanzar el 15% de la misma, o llevarla hasta la falla.
- 8.- Si la muestra falla repentinamente o bruscamente, registrar el tiempo transcurrido tras el último incremento de carga y retirar la misma. Si la falla no es brusca, se da por terminada la prueba al sufrir la muestra una deformación del orden de 15%.
- 9.- Seguir el procedimiento anterior desde el paso 8 en adelante.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

4.2. COMPRESIÓN TRIAXIAL.

Objetivo: Determinar la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, así como sus valores de cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ).

Introducción.

Las pruebas de compresión triaxial son las más usadas para determinar las características de esfuerzo-deformación y de resistencia de los suelos. Los especímenes son usualmente cilíndricos y están sujetos a presiones laterales por un líquido, generalmente agua, del cual se protegen con una membrana impermeable.

Para llevar a cabo el confinamiento, la muestra se coloca en el interior de una cámara de forma cilíndrica, hermética, de lucita y bases metálicas. *Figura 4.32*. En las bases se colocan las piedras porosas, cuya comunicación con una bureta exterior puede establecerse con segmentos de tubo plástico. El agua de la cámara adquiere la presión deseada por medio de la acción de un compresor que los comunica y la carga axial es transmitida por un vástago que atraviesa la base superior de la cámara (Juárez, 1982).

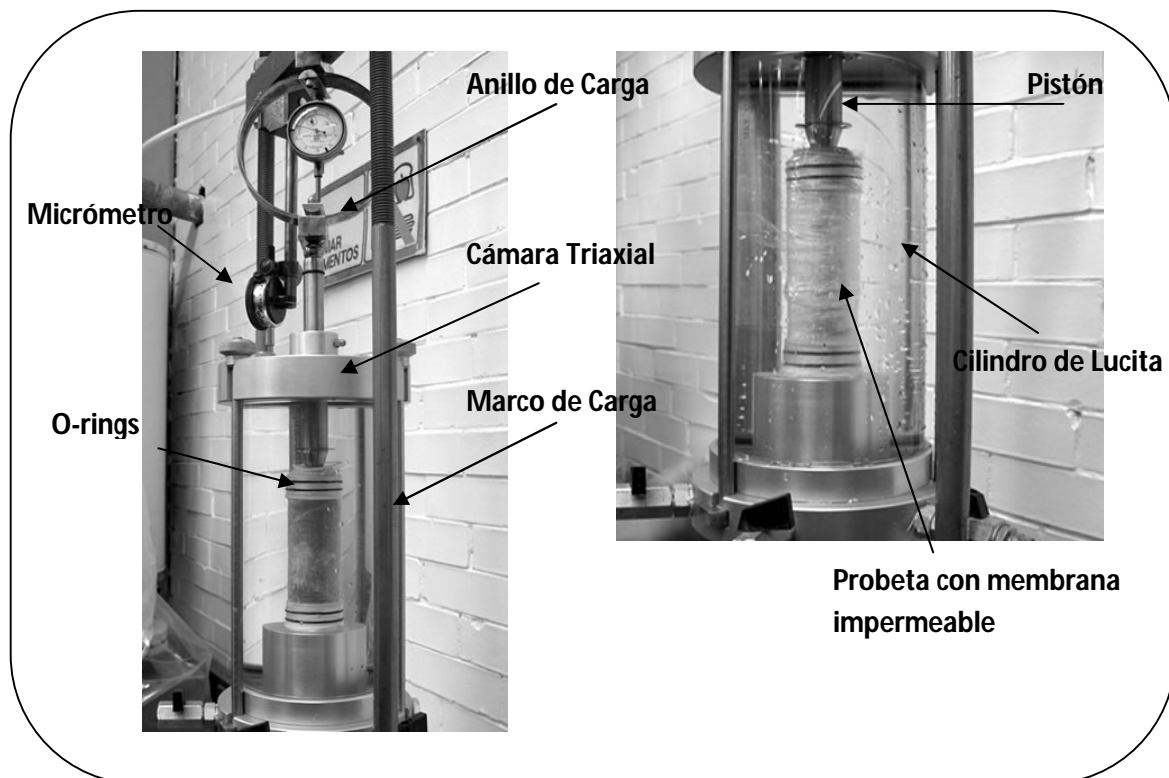


Figura 4.32 Esquema de la cámara de compresión triaxial.

Usualmente se llama σ_1 , σ_2 , σ_3 a los esfuerzos principales mayor, intermedio y menor, respectivamente. En una prueba de compresión, la presión axial es el esfuerzo principal mayor σ_1 y los esfuerzos intermedio y menor son iguales $\sigma_2=\sigma_3$ que están dados por la presión lateral.

Existen tres tipos de pruebas triaxiales:

- a) No consolidada drenada (UU).
- b) Consolidada no drenada (CU).
- c) Consolidada drenada (CD).

4.2.1. Tx_UU, Rápida; no consolidada no drenada.

En esta prueba se determina la resistencia no drenada y la relación esfuerzo-deformación de una muestra cilíndrica inalterada o remoldeada de un suelo cohesivo. Las muestras se someten a una presión de confinamiento en una cámara triaxial. No se permite el drenaje de la muestra durante la prueba. La muestra se lleva a la falla por compresión a una velocidad constante de deformación axial (deformación controlada). En esta prueba se obtienen únicamente esfuerzos totales.

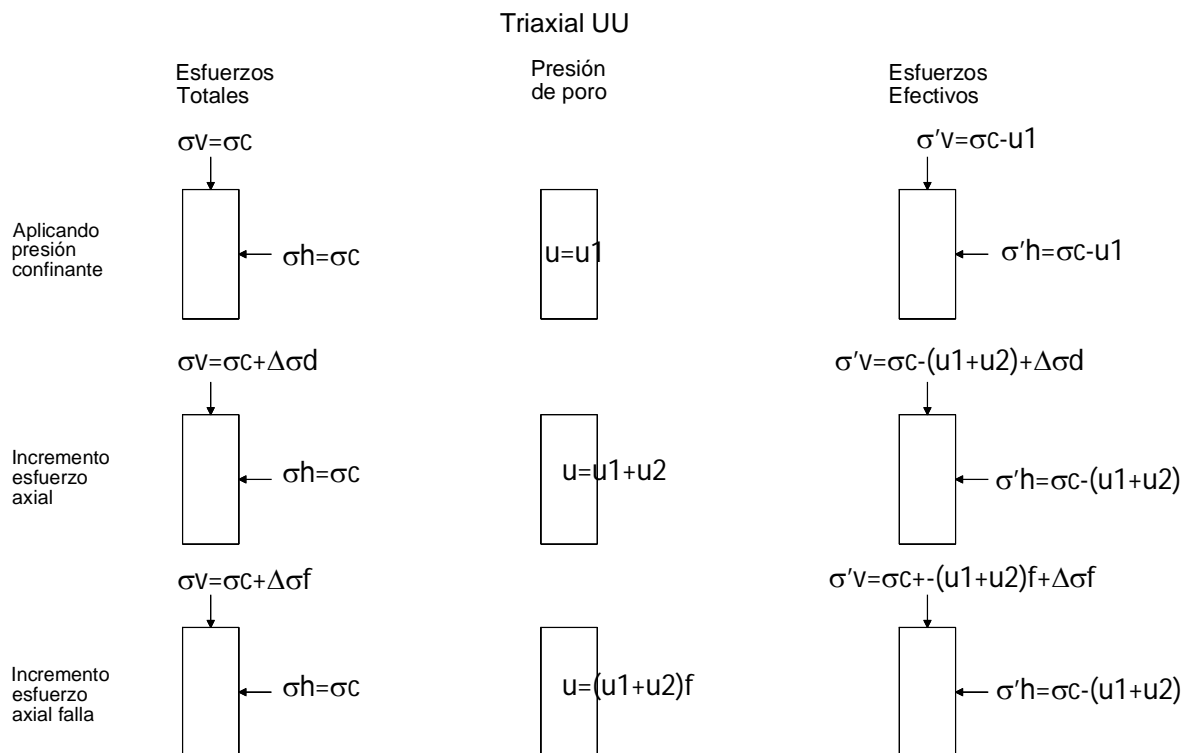


Figura 4.33 Esquema de la prueba UU.

4.2.2. Tx_CU, Consolidada no drenada, Rápida consolidada.

En este tipo de ensayo el espécimen se consolida completamente bajo el estado inicial de esfuerzo. Sin embargo, durante el corte (segunda etapa), se cierran las líneas de drenaje y el espécimen se carga a la falla en condiciones no drenadas. Este procedimiento de ensayo puede utilizarse para simular condiciones de campo donde el estado inicial de carga resulta en la consolidación del suelo sin el peligro de falla, y después se aplica una segunda etapa de carga suficientemente rápida que resulta en carga esencialmente no drenada. Este tipo de carga puede aplicarse a los suelos de un lugar donde un terraplén de tierra se construirá primero y se dejará allí por varios años hasta que los suelos de cimentación se consoliden y luego se construirá relativamente rápido una edificación en el terraplén de tierra. Un ensayo consolidado-no drenado podría utilizarse para determinar la resistencia cortante del suelo bajo el terraplén para su utilización en el diseño de la cimentación de la edificación, y el estado de esfuerzo inicial usado representaría los esfuerzos en el suelo después que se haya consolidado bajo la carga del terraplén. (Este procedimiento de ensayo también puede utilizarse para determinar las propiedades a obtenerse de un ensayo consolidado-drenado, si se miden las presiones de poros durante la etapa de aplicación de corte no drenado).

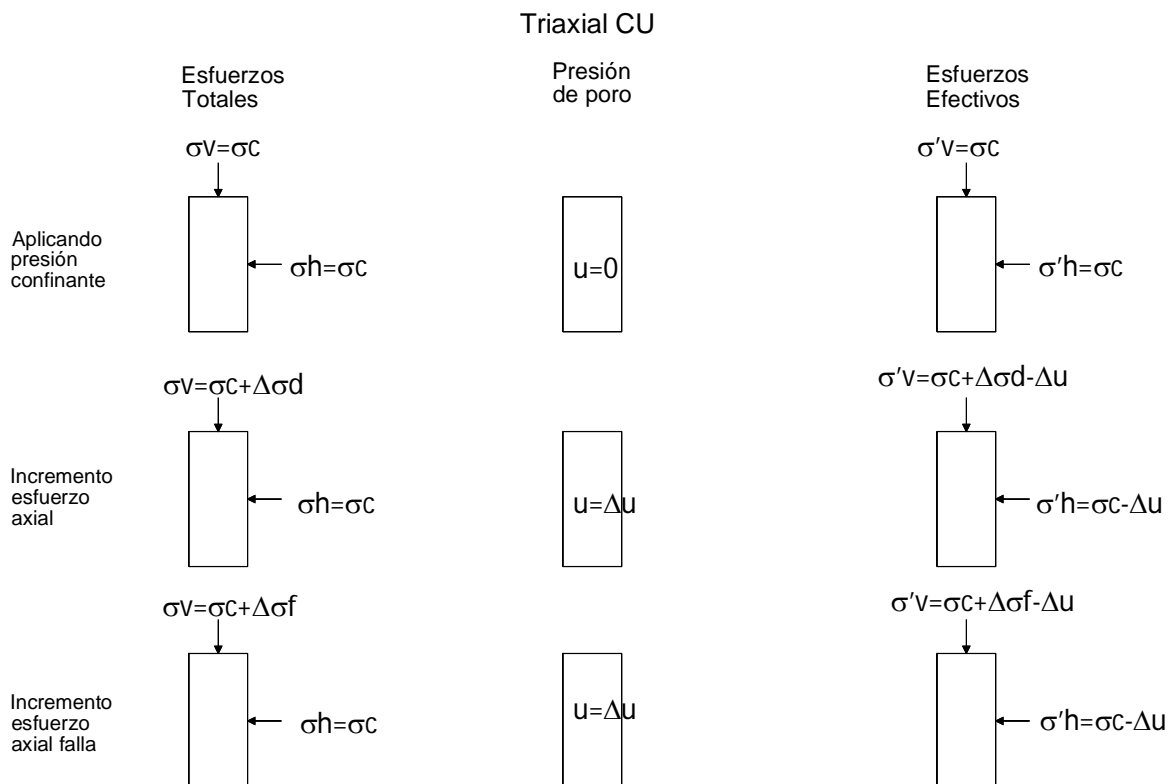


Figura 4.34 Esquema de la prueba CU.

4.2.3. Tx_CD, Lenta; Consolidada drenada.

En este tipo de ensayo primero se consolida completamente al suelo, bajo un estado de esfuerzo inicial. Después se aplica el esfuerzo axial muy lentamente para que las presiones de poro generadas puedan tener tiempo de disiparse, o la carga axial se aplica en incrementos pequeños manteniendo cada incremento hasta que las presiones de poro se hayan disipado antes de aplicar el siguiente incremento. Este procedimiento de ensayo se utiliza cuando el suelo en el campo drena relativamente rápido durante la aplicación de cargas de construcción (en arenas), o cuando el suelo tiene tiempo suficiente para drenar bajo la carga aplicada y la resistencia cortante se determinará cuando la disipación de la presión de poro y el drenaje en el campo hayan ocurrido.

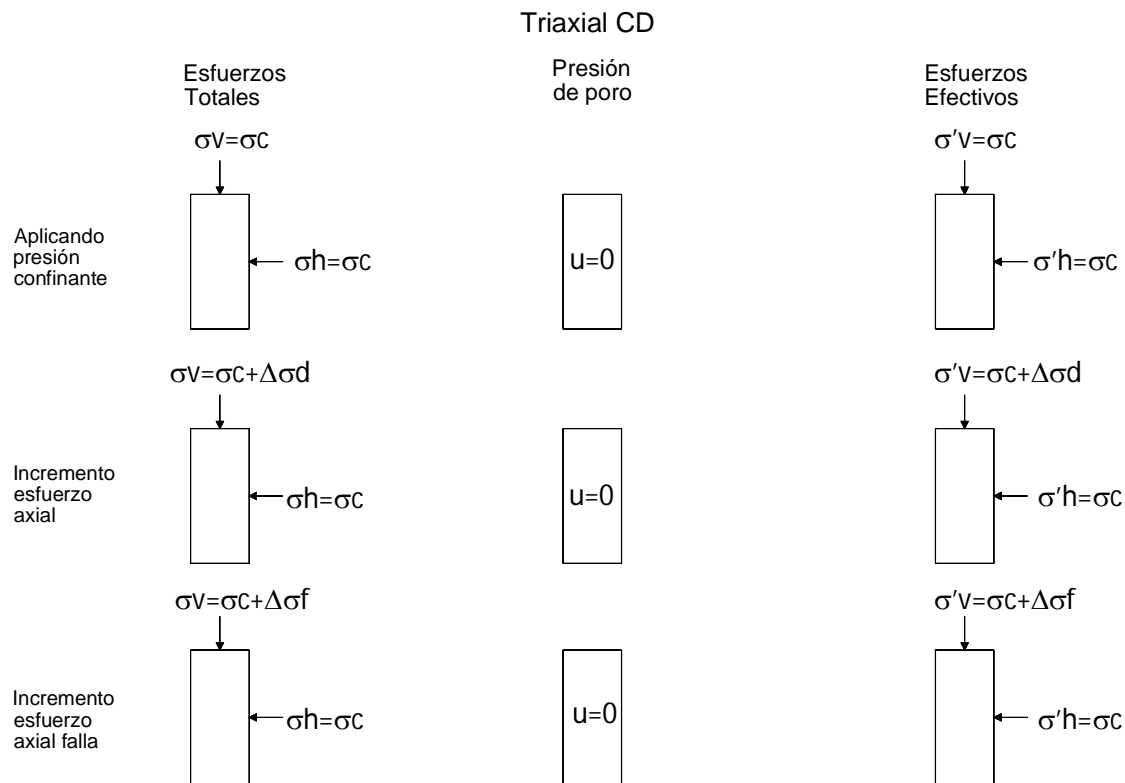


Figura 4.35 Esquema de la prueba CD.

B Skempton

En el equipo suele tenerse un sistema para medir la presión de poro. Pero no la presión del aire, de aquí, parte una necesidad de que los suelos parcialmente saturados tengan una etapa previa de saturación y tener mediciones de presión de poro lo más confiable posibles. Esto se logra elevando la contrapresión a un nivel suficientemente alto para que el agua absorba el aire de los vacíos. Al mismo tiempo la presión en la celda se aumenta para tener un pequeño esfuerzo efectivo en la muestra (10 kPa) la saturación se realiza

por incrementos hasta revisar que el parámetro B de Skempton sea mayor de 0.95. (ASTM D4767).

Cuando se logra este valor se puede decir que la muestra está prácticamente saturada. Cada uno de los incrementos se deje actuar del orden de 15 min, con objeto de estabilizar la presión de poro.

En el momento que B es mayor a 0.95 se puede dejar la contrapresión o retirarla, pero nunca esta debe ser menor a 200 kPa. Ya que esto puede volver a formar burbujas, si se reduce la contrapresión la diferencia de 10 kPa se debe mantener la contrapresión, lo más recomendable es mantenerla y para la etapa de consolidación aumentar la presión de la celda.

El coeficiente B de Skempton se define como:

$$\beta = \frac{\Delta\mu}{\Delta\sigma_3} \dots\dots\dots (4-21)$$

Terminología.

Falla: Condición de esfuerzo máximo para un espécimen de prueba. La falla se considera como la diferencia de los esfuerzos principales máximos (esfuerzo desviador) alcanzados o como la diferencia de los esfuerzos principales (esfuerzo desviador) para un 15% de deformación axial, el que se obtenga primero durante la ejecución de la prueba.

Resistencia a la compresión no consolidada – no drenada: Es la diferencia de los esfuerzos normales principales (esfuerzo desviador) en la falla.

Sistema de compresión. La velocidad de avance del sistema de compresión no debe desviarse +/-5% la velocidad de deformación elegida. El sistema de compresión no debe inducir vibraciones que produzcan cambios en la forma del espécimen. Para corroborar esto último se debe colocar un recipiente con agua en la placa de carga y encender el sistema de compresión a la velocidad a la cual se realizará la prueba, se debe verificar que no se formen hondas en la superficie del agua.

Micrómetro de carga. El micrómetro debe ser capaz de medir la carga axial con una aproximación del 1% la carga axial en la falla.

Cámara triaxial de compresión. La cámara triaxial de compresión debe consistir en una placa superior y una inferior separadas por un cilindro, dicho cilindro debe ser capaz de resistir la presión interna aplicada. La cámara se recomienda que sea transparente para observar el comportamiento del material. La placa superior debe tener una válvula con la que se extraiga el aire al momento de llenar la cámara de agua. La placa inferior también debe tener una válvula con la que se suministre agua a presión dentro de la cámara.

Pistón de carga axial. El pistón y su sello se deben diseñar de modo que la variación en la carga axial debido a la fricción no exceda el 0.1% la carga axial en la falla, de modo que no exista la generación de momento lateral por parte del pistón durante la carga.

Sistema de presión. El sistema de presión debe ser capaz de aplicar y mantener la presión dentro de la cámara dentro de +/-2kPa para presiones menores de 200kPa y

dentro de +/- 1% para presiones mayores de 200kPa. Este sistema consiste en un cilindro de reserva conectado a la cámara triaxial, y está parcialmente lleno con el fluido de la cámara. La parte superior de este cilindro está conectado a un compresor. La presión se controla con un regulador y se mide con un manómetro.

Base y cabezal. Se debe utilizar una base y un cabezal impermeables para evitar que exista drenaje en el espécimen. Se deben de construir con un material anticorrosivo e impermeable y ambos deben tener una superficie plana circular. El peso del cabezal debe producir un esfuerzo axial en el espécimen menor a $1\text{kN}/\text{m}^2$. El diámetro del cabezal y de la base deben ser iguales al diámetro inicial del espécimen. La base del espécimen debe estar conectada con la base de la cámara triaxial para evitar movimientos laterales y el cabezal debe de alinearse con el pistón y el eje vertical del espécimen, la excentricidad no debe ser mayor a 1.3mm.

Micrómetro de deformación. Las deformaciones verticales del espécimen deben medirse con una aproximación de al menos el 0.03% la altura de éste. El micrómetro debe tener un rango de viaje de por lo menos el 20% la altura de la muestra.

Membrana de hule. La membrana debe proveer protección contra la filtración y debe ser inspeccionada cuidadosamente antes de usarse para observar que no esté perforada. Para evitar que la membrana apriete a la muestra, ésta debe tener un diámetro sin estirarse entre el 90 y el 95% el diámetro del espécimen. El espesor de la membrana no debe exceder el 1% el diámetro del espécimen. La membrana debe fijarse a la base y al cabezal con O-rings.

Uso y significado.

En este tipo de prueba la resistencia a la compresión de un suelo se determina en términos de esfuerzos totales, por lo tanto, la resistencia obtenida depende de la presión desarrollada en el agua de poro durante la carga. En esta prueba no se permite el drenaje de la muestra, por lo que la presión de poro que se genera y la resistencia del suelo, difieren de la que se desarrolla cuando se permite el drenaje.

Si la muestra está 100% saturada, no puede ocurrir consolidación durante la aplicación de la presión de confinamiento ni tampoco durante la etapa de falla. Por lo tanto, si se prueban varios especímenes del mismo material (con aproximadamente el mismo contenido de agua y relación de vacíos) éstos tendrán aproximadamente la misma resistencia al corte no drenada. Por lo que cuando los especímenes se encuentran totalmente saturados la envolvente de falla de Mohr usualmente es una línea recta horizontal.

Si los especímenes se encuentran parcialmente saturados (grado de saturación menor al 100%) ocurre una consolidación durante la aplicación de la presión de confinamiento así como durante la prueba, sin importar que la prueba sea no drenada. Por lo mismo, si se ensayan varios especímenes no saturados del mismo material bajo diferentes esfuerzos de confinamiento, éstos no tendrán la misma resistencia al corte no drenada. Por lo tanto, la envolvente de falla de Mohr es usualmente una línea curva.

La resistencia triaxial no consolidada no drenada se utiliza en situaciones en donde las cargas se aplican en forma rápida y en donde el tiempo de aplicación es muy corto para que la presión de poro inducida se disipe y se genere la consolidación del material. La resistencia a la compresión obtenida con esta prueba no se puede aplicar en los casos en donde las condiciones de carga en campo difieran de aquellas utilizadas en esta prueba.

Cálculos Triaxial UU.

Calcular la deformación axial y el área transversal corregida con las ecuaciones 4-17 y 4-18.

Calcular la diferencia de los esfuerzos principales (esfuerzo desviador) con la ecuación 4-22.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A_c} \dots\dots\dots (4-22)$$

Donde:

P = carga aplicada (a cada 1kPa).

Graficar la curva esfuerzo desviador (ordenada) en kg/cm^2 y en kPa – deformación axial (abscisa) en % y seleccionar el valor máximo del *esfuerzo desviador* o el *esfuerzo desviador para el 15% de deformación axial*, el que ocurra primero. La escala a utilizar en el eje de las abscisas debe ser de 0 a 20% *Figura 4.22*.

Graficar la curva esfuerzo de compresión (ordenada) en kg/cm^2 y en kPa – deformación axial (abscisa) en mm/mm y determinar la pendiente de la recta que une el punto del origen de la gráfica con el punto máximo del esfuerzo de compresión para obtener el *Modulo Elástico Secante (Es)* en kg/cm^2 y en kPa. La escala a utilizar en el eje de las abscisas debe ser de 0 a 0.2 *Figura 4.23*.

Calcular los esfuerzos totales principales mayor y menor a la falla:

σ_{3f} = esfuerzo total principal menor a la falla = presión de la cámara.

σ_{1f} = esfuerzo total principal mayor a la falla = esfuerzo desviador a la falla más la presión de la cámara.

Graficar los círculos de Mohr y determinar la cohesión del suelo en kg/cm^2 y en kPa, y el ángulo de fricción aparente *Figura 4.36*.

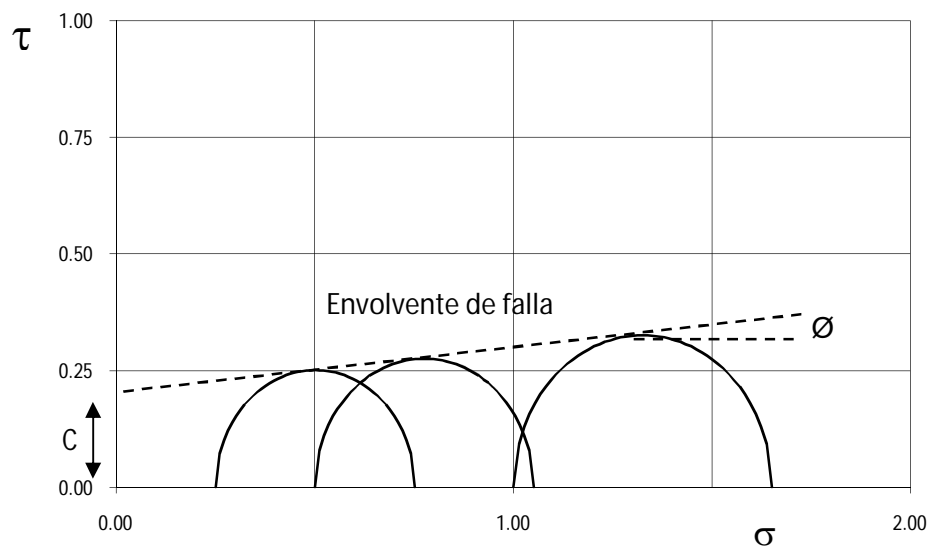


Figura 4.36 Circulo de Mohr y envolvente de falla.

Cálculos Triaxial CU.

El área corregida de la muestra al fin de la primera etapa, que es inicial para la segunda etapa de carga, se calcula con la expresión siguiente:

$$A_0 = \frac{V - \Delta V}{H - \Delta H} \dots \dots \dots (4-22)$$

Donde:

V= Volumen original del espécimen.

ΔV = Cambio de volumen, registrado en la bureta.

H= Altura original de la muestra.

ΔH = Cambio de altura de la muestra, registrado por el extensómetro.

En la segunda etapa deberá calcularse el área de la muestra correspondiente a cada incremento de carga aplicado, mediante la fórmula (4-18). Con ello se trazaran las curvas de esfuerzo-deformación.

Cálculos Triaxial CD.

El área al momento de la falla se calcula con la expresión anterior, para así calcular el esfuerzo desviador.

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 15

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

“RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE DE LOS SUELOS”.

“COMPRESIÓN TRIAXIAL.”

Práctica No. 15**Compresión Triaxial UU.**

Objetivo: Determinar la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, así como sus valores de cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ).

Herramienta y Equipo.

- Marco de carga.
- Cámara triaxial.
- Anillo de carga con micrómetro.
- Vernier.
- Cronómetro.
- Equipo y herramienta de labrado.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs
- Curva de calibración del anillo.
- Sistema de compresión.
- Micrómetro de deformación.
- Cabeceador.
- Cilindro de colocación.
- Extractor de muestras.
- Cápsulas de porcelana.
- Horno de secado a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Material.

- Muestra de suelo.
- Membrana de hule.
- Papel filtro.
- Agua.

Procedimiento.

1.- Realizar el procedimiento de preparación de la muestra y determinar sus dimensiones mencionadas (*se describe en compresión simple*).

2.- Colocar la membrana en el cilindro de colocación, cuya finalidad es impedir que el agua contenida en la cámara triaxial para la aplicación de la presión confinante, se infiltre en el espécimen de suelo.



Figura 4.37 Colocación de la membrana en el cilindro.

3.- Acomodar la muestra en la base de la cámara con el cabezal. Colocar el cilindro de colocación entre la muestra y deslizar la membrana sobre la base y el cabezal, sellando con dos (*O-rings*) aro sellos en cada extremo.

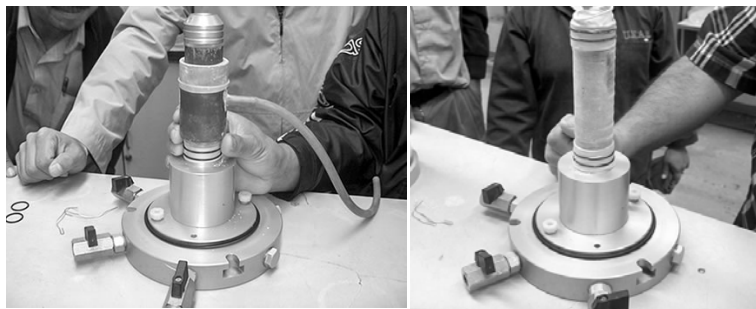


Figura 4.38 Colocación de la probeta en la base de la cámara.

4.- Armar la cámara triaxial. Bajar el pistón de carga hasta que haga contacto con el cabezal y alinear longitudinalmente con la muestra.



Figura 4.39 Contacto del pistón de carga con el cabezal.

5.- Colocar el micrómetro de deformación en ceros (o tomar la lectura inicial), se debe tener precaución de no aplicar ninguna carga axial a la muestra. Si el peso del pistón es suficiente como para aplicar un esfuerzo axial mayor al 0.5% de la resistencia a la compresión estimada, sujetar el pistón sin que toque el cabezal y bajarlo hasta que se aplique la presión interna de la cámara.

6.-Alinear la cámara triaxial con el marco de carga y el dispositivo de medición para evitar la aplicación de una carga lateral al pistón durante la prueba. Llenar la cámara con el líquido de confinamiento. Ajustar la presión deseada dentro del cilindro de reserva y enviar la presión al líquido de la cámara triaxial. Esperar 10min después de la aplicación de la presión de la cámara para permitir que la muestra se estabilice. El periodo de espera puede ser mayor para suelos blandos o parcialmente saturados.

7.-Aplicar la carga con una velocidad de deformación axial de 1%/min para materiales cohesivos y de 3%/min para materiales frágiles que alcanzan un esfuerzo desviador máximo de aproximadamente el 3 a 6% de deformación. A estas velocidades, el tiempo para alcanzar el esfuerzo desviador máximo será aproximadamente de 15 a 20min. Continuar con la carga hasta el 15% de la deformación axial. Excepto cuando el esfuerzo desviador presente un pico y luego caiga un 20%.

8.-Anotar la carga, deformación y el tiempo para incrementos de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5% de deformación; y luego para incrementos de 0.5% hasta 3% de la deformación y por último a cada 1%. Tomar suficientes lecturas para definir la forma de la curva esfuerzo – deformación, se recomienda que se tomen más puntos al inicio de la prueba y durante la aproximación de la falla.

9.-Determinar el contenido de agua (indicar sí el contenido de agua se obtuvo de los cortes o de la muestra ensayada).

10.- Hacer un esquema de la muestra fallada y mostrar la pendiente de falla.

11.- Realizar los cálculos para determinar el esfuerzo desviador del suelo.

13.- Graficar el círculo de Mohr y determinar la *resistencia al esfuerzo cortante* (S_u) como $\frac{1}{2}$ de q_u en kg/cm^2 y en kPa y el ángulo de fricción interna (\emptyset).

14.- Construir la gráfica del esfuerzo desviador (kPa)-deformación axial (%) y determinar el valor máximo del esfuerzo desviador.

15.- Construir la gráfica del esfuerzo de compresión (kPa)-deformación axial (mm/mm) y determinar la pendiente de la recta, que une el punto de origen de la gráfica con el punto máximo de compresión. La escala a utilizar en el eje de las abscisas debe ser de 0 a 0.2.

16.- Determinar el módulo de elasticidad del suelo (E_s).

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

Triaxial CD y CU.

Objetivo: Realizar las pruebas triaxiales CU y CD a diversas muestras de suelo, con el fin de analizar su comportamiento y de determinar sus parámetros de resistencia al esfuerzo cortante.

Herramienta y Equipo.

- Equipo de triaxial UU.
- Tanque de aire comprimido.
- Manómetro.
- Tanque regulador de presión.
- Tubería de sarán de 1.80 m de longitud.
- Horno de secado a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Material.

- Muestra de suelo.
- Membrana de hule.
- Papel filtro.
- Agua.

Procedimiento CU (Consolidada, no drenada).

- 1.-Repetir los pasos del 1 al 3 del procedimiento de la triaxial UU.
- 2.- Colocar la cámara en el marco de carga.
- 3.- Llenar la cámara con agua, evitando que quede aire atrapado en ella, y verificar que el nivel del agua en el tanque de control se encuentre aproximadamente al mismo nivel que el de la probeta.
- 4.- Aplicar al mismo tiempo una presión confinante de 0.5 kg/cm^2 y una contrapresión al cabezal superior de la probeta de 0.2 kg/cm^2 . Mida la presión de poro en el cabezal inferior, una vez que esta se ha vuelto constate.
- 5.- Repetir el proceso aumentando tanto la presión confinante como la contrapresión (siempre se debe mantener la misma diferencia entre estos dos valores). El proceso se debe repetir tantas veces como sea necesario, para que la presión de poro medida coincida con la contrapresión aplicada, momento para el cual se considera que el suelo se encuentra saturado.
- 6.- Determinar el valor de la B de Skempton, debe ser >0.95 para considerar que la muestra está saturada.

7.- Una vez saturado el suelo, mantener constante la contrapresión, e incrementar la presión confinante hasta que la diferencia entre ambas sea igual a la presión de consolidación que se desea aplicar en la prueba.

Una vez que la muestra ha sido saturada y tiene la presión de consolidación que se desea, se abren las válvulas de drenaje y se pone en marcha el cronometro. Tomar lecturas de la bureta y del micrómetro a intervalos definidos (misma secuencia de lecturas que en una prueba de consolidación).

Construir una grafica semilogarítmica de la variación de volumen y de deformación axial a través del tiempo.

8.- Proceda a la ruptura de la probeta, con las válvulas de drenaje cerradas:

- ~ Prueba de deformación controlada: Tomar lecturas simultaneas de carga, presión de poro y deformación axial con la frecuencia necesaria para definir la curva deformación unitaria – esfuerzo (es usual usar velocidades de deformación de 1 mm/minuto). Las lecturas se deben suspender cuando la deformación corresponda a un 25% de la altura inicial de la probeta.
- ~ Prueba de carga controlada: Aplicar incrementos cada minuto. Los primeros incrementos deben ser de aproximadamente 10 % de la carga de falla estimada, reduciéndose a la mitad o a la cuarta parte de este valor al acercarse a la falla. Las lecturas deben hacerse inmediatamente antes de aplicar cada incremento de carga (conforme obtiene los datos de cargas aplicadas y deformaciones, graficar a fin de verificar que los incrementos de carga aplicados son los adecuados).

A los valores de presión de poro medidos, se les debe restar el valor de la presión de poro correspondiente a la contrapresión.

9.- Anular la presión confinante y la contrapresión, de manera simultánea.

10.- Vaciar el agua de la cámara triaxial y desarmarla.

11.- Medir la altura final de la probeta y el ángulo del plano de falla, si se definió, haciendo un croquis del espécimen deformado.

12.- Pesar la probeta después del ensayo, y determinar su peso es estado seco.

13.- Repetir el ensayo por lo menos cuatro veces a diferentes presiones confinantes, a fin de definir la envolvente de Mohr.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

Procedimiento CD (Consolidada, drenada).

- 1.- Una vez que la muestra se ha preparado (esta se encuentra sometida a vacío), se aplica cierta presión confinante (colocar la pesa que evita el ascenso del vástago).
- 2.- Retirar el vacío de la muestra, y saturarla con agua desaireada mediante circulación de agua con ayuda de un ligero vacío.
- 3.- Aumentar la presión confinante hasta el valor deseado.
- 4.- Abrir las válvulas de drenaje y tome las lecturas del micrómetro y de la bureta una vez que se ha estabilizado el sistema. Etapa de consolidación como en CU.
- 5.- Proceder a la ruptura de la probeta, manteniendo las válvulas de drenaje abiertas:

Para suelos cohesivos necesariamente se debe hacer con el método de carga controlada. Si se realiza en suelos no cohesivos, se puede realizar con el método de carga controlada o con el de deformación controlada, debido a que la disipación de la presión de poro es casi inmediata.

- ~ Prueba de deformación controlada: Tomar lecturas simultáneas de carga y deformación axial con la frecuencia necesaria para definir la curva esfuerzo - deformación unitaria (la velocidad de deformación debe ser lo suficientemente baja para permitir la disipación de las presiones de poro generadas).
 - ~ Prueba de carga controlada: Aplicar incrementos de carga (estos pueden ser cada minuto), los primeros incrementos deben ser de aproximadamente 10 % de la carga de falla estimada, reduciéndose a la mitad o a la cuarta parte de este valor al acercarse a la falla. Se deben tomar lecturas del micrómetro y de la bureta antes de aplicar cada incremento.
- 6.- Anular la presión confinante, vacíe el agua de la cámara triaxial y desármela.
 - 7.- Medir la altura final de la probeta y haga un croquis del espécimen deformado.
 - 8.- Determinar el peso de la muestra en estado seco.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

4.3. COMPACTACIÓN.

Objetivo: Determinar la prueba de compactación de un suelo para obtener la curva del peso específico seco máximo-contenido de agua óptimo, por medio de las pruebas proctor estándar y modificada, así mismo la prueba porter.

Introducción.

Se entiende por compactación la aplicación mecánica de cierta energía o cantidad de trabajo por unidad de volumen, para lograr una reducción de los espacios entre las partículas sólidas de un suelo, con el objeto de mejorar sus características mecánicas. Al obtenerse un mejor acomodo de las partículas sólidas y la expulsión de aire que contiene el suelo, se produce un aumento de su peso volumétrico o específico.

A un suelo cuya contenido de agua es bajo se le van dando ciertos incrementos de agua y se le aplica cada vez la misma energía de compactación, su peso volumétrico va aumentando, propiciado por la acción lubricante del agua, hasta que llega un momento en el que el peso volumétrico del material seco, calculado a partir del peso volumétrico del material húmedo y del contenido de agua, alcanza un valor máximo.

Al contenido de agua con el que se obtiene el mejor acomodo de partículas y el mayor peso volumétrico o específico del material seco, para una determinada energía de compactación, se le denomina contenido de agua óptimo y al peso volumétrico correspondiente se le designa como peso volumétrico o peso específico seco máximo.

Cuando a partir de esta condición de humedad óptima y peso volumétrico seco máximo, se incrementa el agua para un mismo volumen, el agua con el aire remanente ocuparían el lugar de algunas partículas de suelo, obteniéndose en consecuencia pesos volumétricos que van siendo menores a medida que el agua aumenta. Si en un sistema de ejes coordenados se sitúan los puntos correspondientes a cada peso volumétrico seco con su respectiva humedad y se unen con una curva, quedará representada la variación del peso volumétrico de un material para diferentes contenidos de agua y una misma energía de compactación; esta curva adopta aproximadamente la forma de una parábola, siendo más pronunciada su curvatura en el caso de suelos arenosos que en los suelos arcillosos.

El contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo de un suelo, también varían con la energía de compactación; cuando ésta se aumenta, se obtienen mayores pesos volumétricos secos máximos con $W\%$ óptimos menores. A su vez, son función del tipo de suelo; los suelos gruesos, para una misma energía de compactación, tienen en general mayores pesos volumétricos y menores contenidos de agua que los suelos finos.

De acuerdo con la naturaleza de los materiales y con el uso que se les pretenda dar, se han establecido procedimientos de prueba para llevar a cabo la compactación de los suelos en el laboratorio, con objeto de referenciar y evaluar la compactación que se alcanza con los procedimientos aplicados en el campo, para determinar el grado de compactación del material.

Se toma en cuenta la forma de aplicar la energía al material, las pruebas de compactación que se emplean en este documento son de los siguientes tipos:

- Proctor Estándar y Modificada (Dinámicas).
- Porter (Por carga estática).
- Cono de Área (En el sitio).

4.3.1. COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR Y MODIFICADA (ASTM D 698-91).

Objetivo: Determinar la prueba de compactación de un suelo, para la obtención de la curva del peso específico seco máximo-contenido de agua óptimo, por medio de las pruebas proctor estándar y modificada.

Existen muchos métodos para reproducir teóricamente en el laboratorio unas condiciones dadas de compactación de campo. El primer método en el sentido de la técnica actual es debido a R.R. Proctor y es conocido hoy en día como Prueba Proctor Estándar o A.A.S.H.O. (American Association of State Highway Officials) Estándar. Consiste en compactar el suelo en 3 capas dentro de un molde de dimensiones especificadas y por medio de 25 golpes a cada capa propiciados con un pistón, que se deja caer libremente de una altura específica.

Con este procedimiento de compactación Proctor estudió la influencia que ejercía en el proceso el contenido de agua inicial de agua en el suelo, encontrando que tal valor es de vital importancia en la compactación. Observó que a contenidos de agua crecientes, a partir de valores bajos, se obtienen más altos pesos específicos secos y por lo tanto mejores compactaciones, pero esa tendencia no se mantiene indefinidamente, si no que al pasar el contenido de agua de un cierto valor, los pesos específicos secos obtenidos disminuyen, por lo que la compactación en la muestra es peor. Proctor puso de manifiesto que el uso del procedimiento descrito para un suelo dado existe un contenido de agua inicial llamado "óptimo", el cual produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con este procedimiento de compactación (Juárez, 1982).

Debido al rápido desenvolvimiento del equipo de compactación de campo comercialmente disponible, la energía específica de compactación en la prueba Proctor Estándar ya no lograba representar en forma adecuada las compactaciones mayores que se lograban con el equipo nuevo. Lo que condujo a una modificación en la prueba, aumentando la energía de compactación, de modo que conservando el número de golpes por capa, se elevo el número de estas de 3 a 5, aumentando la energía del pistón y la altura de caída del mismo.

Esta prueba modificada es conocida como Prueba Proctor Modificada o A.A.S.H.O Modificada (Juárez, 1982).

Se especifican tres procedimientos alternativos. El procedimiento usado debe ser como se especifica para el material muestreado. Si no se especifica un procedimiento, la selección se basa en la granulometría del material.

Procedimiento A (ASTM D 698-91).

Molde	101.6mm de diámetro
Material	Pasa la malla No. 4 (4.75mm)
Capas	3
Golpes por capa	25
Uso	Se puede usar si el 20% en peso del material o menor se retiene en la malla No.4.
Otros usos	Si no se especifica este procedimiento y el material cumple con la granulometría anterior se debe usar el procedimiento B o C

Procedimiento B (ASTM D 698-91).

Molde	101.6mm de diámetro
Material	Pasa la malla No. 3/8" (9.5mm)
Capas	3
Golpes por capa	25
Uso	Se debe usar si más del 20% en peso del material se retiene en la malla No. 4 (4.75mm) y el 20% en peso del material o menor se retiene en la malla 3/8" (9.5mm).
Otros usos	Si no se especifica este procedimiento y el material cumple con la granulometría anterior se debe usar el procedimiento C

Procedimiento C (ASTM D 698-91).

Molde	152.4 mm de diámetro
Material	Pasa la malla No. 3/4" (19.0mm)
Capas	5
Golpes por capa	56
Uso	Se debe usar si más del 20% en peso del material se retiene en la malla 3/8" (9.5mm) y menos del 30% en peso del material se retiene en la malla 3/4" (19.0mm).

El molde de 6" (152.4mm) de diámetro no se debe usar con los Procedimientos A y B.

Terminología.

Sobre tamaño de partículas o fracción gruesa (Pc en %): Es la parte de la muestra total no usada para la realización de la prueba de compactación; es decir, es la parte retenida en la malla No. 4 (4.75mm), 3/8" (9.5mm) o 3/4" (19.0mm), dependiendo del procedimiento a usar.

Esfuerzo estándar de compactación: Es el esfuerzo de compactación de 600 kN-m/m³ aplicado por el equipo y por el procedimiento ejecutado en esta prueba.

Peso volumétrico seco máximo estándar (γd máx en kN/m³): Es el valor máximo definido en la curva de compactación utilizando un esfuerzo de compactación estándar.

Contenido de agua óptimo estándar (w opt en %): Es el contenido de agua en donde el suelo puede compactarse a un peso volumétrico seco máximo utilizando un esfuerzo de compactación estándar.

Fracción de prueba o fracción fina (PF en %): Es la parte de la muestra total usada para realizar la prueba de compactación; es decir, es la fracción que pasa la malla No. 4 (4.75mm) para el procedimiento A, 3/8" (9.5mm) para el procedimiento B, o 3/4" (19.0mm) para el procedimiento C.

Uso y significado.

El suelo colocado como un relleno ingenieril (terraplén, relleno de cimentación, talud) se compacta a un estado más denso para obtener propiedades mecánicas adecuadas: resistencia cortante, compresibilidad o permeabilidad. Inclusive, los suelos debajo de las cimentaciones se compactan para mejorar sus propiedades mecánicas.

La prueba de compactación de laboratorio provee la base para determinar el grado de compactación (G_c %) o la compacidad relativa (C_r %), y el contenido de agua necesario para alcanzar las propiedades mecánicas requeridas; así como para controlar los procedimientos constructivos y asegurar que la compactación alcanzada y el contenido de agua sea la especificada.

Durante el diseño de rellenos ingenieriles las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante, de consolidación y de permeabilidad, requieren la preparación de especímenes de prueba; esto se realiza compactando un suelo para un contenido de agua y peso volumétrico dado. Es común en la práctica, primero determinar el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo bajo una prueba de compactación dada. Los especímenes de prueba se compactan con contenidos de agua elegidos, ya sea por abajo o por arriba del contenido de agua óptimo, o inclusive para el contenido de agua óptimo; y para un peso volumétrico seco, relacionado con un porcentaje del peso volumétrico seco máximo.

La selección del contenido de agua, ya sea por abajo o por arriba del contenido de agua óptimo, o en el óptimo; y el peso volumétrico seco máximo se pueden basar en la experiencia, o se puede investigar un rango de valores para determinar el porcentaje necesario de compactación.

Preparación de la muestra.

La masa de la muestra requerida para los procedimientos A y B, debe ser de aproximadamente 16kg y para el procedimiento C debe ser de aproximadamente 29kg de suelo seco. Por lo tanto, la muestra de campo debe tener una masa húmeda de por lo menos 23kg y de 45kg, respectivamente.

Determinar el porcentaje de material apropiado, retenido en la malla No 4 (4.75mm), 3/8" (9.5mm) o 3/4" (19.0mm), dependiendo del procedimiento A, B o C que se escoja. Realizar esta determinación por medio de la separación de una porción representativa de la muestra total y determinar los porcentajes que pasan las mallas de interés por medio del Método de Prueba ASTM D 422. Se requiere determinar únicamente el porcentaje retenido para la malla que se especifica anteriormente.

Tabla 4.2 muestra el tiempo de reposo que se le debe dar al espécimen para distribuir uniformemente su contenido de agua.

Tabla 4.2 Tiempos requeridos de reposo para especímenes (ASTM D 15157-00).

Clasificación	Tiempo mínimo requerido (h)
GW, GP, SW, SP	No se requiere
GM, SM	3
Todos los demás suelos	16

Proctor Modificada (ASTM D 1557- 91).

Para esta prueba se sigue el mismo procedimiento que para la prueba de compactación estándar, pero se cambia el pistón de 44.5 kN (estándar 24.4 kN) con una altura de caída de 457 mm (estándar 305 mm). También el suelo se compacta en 5 capas y se le aplican 56 golpes por capa (estándar 3 capas y 25 golpes). Por lo cual su energía de compactación es de 2,700 kN-m/m³ (Bardet, 1997).

Cálculos.

Calcular la densidad húmeda del material con la ecuación (4-22) y la densidad seca con la ecuación (4-24), y con la ecuación (4-25) el peso volumétrico seco.

$$\rho_m = \frac{(M_t - M_{md})}{1000 V} \dots\dots\dots (4-22)$$

Donde:

ρ_m = Densidad húmeda del espécimen compactado (Mg/m³).

M_t = Masa del espécimen compactado más el molde (kg).

M_{md} = Masa del molde (kg)

V = Volumen del molde de compactación (m³) (se determina con la ecuación 4-23).

$$V = \frac{\pi h(dt+db)^2}{16(10^9)} \dots\dots\dots (4-23)$$

Donde:

V = Volumen del molde (m³)

H = Altura promedio (mm)

dt = Diámetro promedio superior (mm)

db = Diámetro promedio inferior (mm)

1/10⁹ = Constante para transformar de mm³ a m³

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1+(w/100)} \dots\dots\dots (4-24)$$

Donde:

ρ_d = Densidad seca del espécimen compactado (Mg/m³).

ρ_m = Densidad húmeda del espécimen compactado (Mg/m³).

W = Contenido de agua (%).

$$\gamma_d = 9.807 \rho_d \dots\dots\dots (4-25)$$

Donde:

γ_d =Peso volumétrico seco del espécimen compactado (kN/m^3).

9.807= Aceleración gravitacional.

Graficar la curva peso volumétrico seco (ordenadas) en kN/m^3 – contenido de agua (abscisas) en %. De la curva de compactación determinar el contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo *Figura 4.40*.

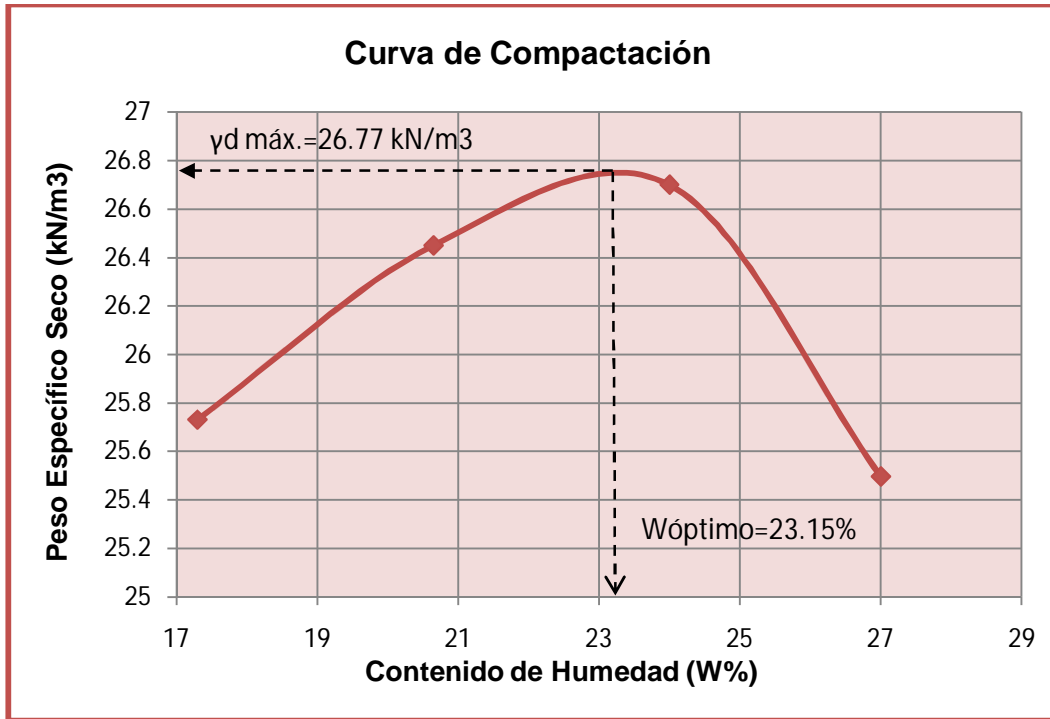


Figura 4.40 Ejemplo de la curva de compactación ($\gamma_{d\text{máx}}$ y $W_{\text{óptimo}}$).

Curva de Saturación.

Los valores del contenido de agua para la condición de una saturación del 100% se determinan como sigue, seleccionar valores del peso volumétrico seco y calcular los valores correspondientes del contenido de agua para la condición del 100 % de saturación con la ecuación 4-26.

$$W_{sat} = \frac{\gamma_w (G_s - \gamma_d)}{\gamma_d G_s} \dots\dots\dots (4-26)$$

Donde:

W = Contenido de agua para una saturación del 100%.

γ_w = Peso volumétrico del agua ($9.807 \text{ kN}/\text{m}^3$).

γ_d = Peso volumétrico seco.

G_s = Gravedad específica (peso específico de los sólidos del suelo).

Dibujar la curva de saturación $S = 100\%$. Teóricamente, la curva de compactación no se puede localizar del lado derecho de la curva de saturación, ya que de suceder esto, existe un error en la gravedad específica, en los cálculos, en el procedimiento de la prueba o en la forma de graficar los datos *Figura 4.41*.

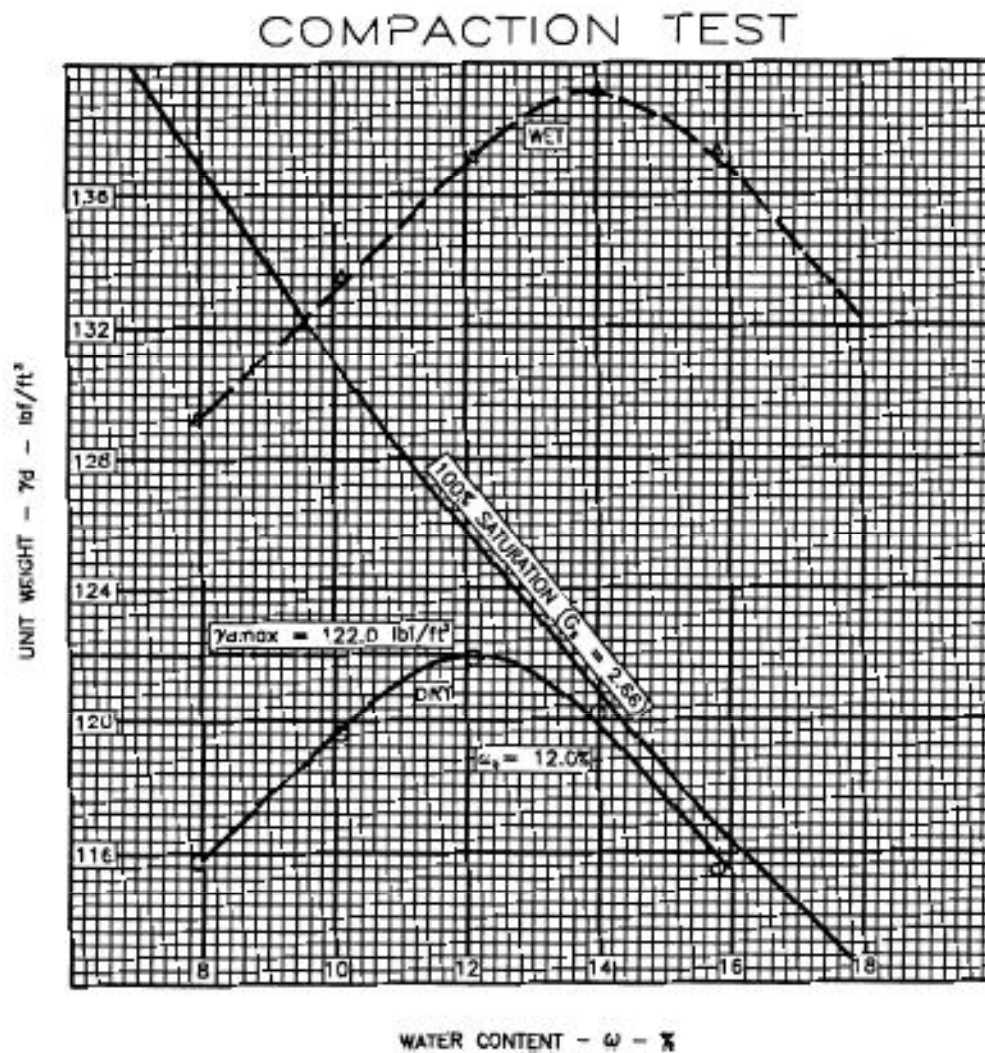


Figura 4.41 Ejemplo de la curva de compactación (ASTM D1557-00).

4.3.2. PRUEBA PORTER.

Objetivo: Determinar el peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y el contenido de agua óptimo del suelo en estudio ($W_{\acute{o}pt}$). Esta prueba se recomienda en suelos friccionantes (gravas y arenas) que pasan la malla de 1"; suelos que comúnmente se utilizan en la construcción de terracerías.

Introducción.

En suelos friccionantes es muy común que las pruebas dinámicas produzcan una curva de compactación con una forma inadecuada para la determinación del peso volumétrico seco máximo y una humedad óptima. También, para este tipo de suelos existen otras pruebas de compactación en las que usualmente se define una curva de compactación de forma típica, adaptada para los fines que se persiguen.

Una de estas es la prueba de compactación estática, que introdujo O. J. Porter y que alcanzó su forma definitiva alrededor de 1935. En ella se compacta al suelo colocándolo dentro de un molde cilíndrico de unas 6" de diámetro, el suelo se dispone en tres capas y se acomoda con 25 golpes de una varilla con punta de bala, lo que no significa una compactación intensa, pues la varilla es ligera y la altura de caída, que no está especificada es la mínima utilizable por el operador para la manipulación cómoda.

La compactación propiamente dicha se logra al aplicar al conjunto de tres capas una presión de 140.6 Kg/cm^2 , la cual se mantiene durante un minuto.

Este método de prueba sirve para determinar el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima en suelos con partículas gruesas que se emplean en la construcción de terracerías; también se puede emplear en arenas y en materiales finos cuyo índice plástico sea menor que 6. El método consiste en preparar especímenes con material que pasa la malla de una pulgada, a los que se le agregan diferentes cantidades de agua y se compactan con carga estática.

Uso y significado.

En esta práctica se determina la compactación por carga estática ya que es igual que la prueba Proctor, se calcula el peso específico seco máximo y contenido de agua.

El objeto de la prueba es determinar el peso específico seco máximo Porter y contenido de agua óptimo en suelos con partículas mayores al tamiz 1" a las cuales no se les puede hacer la prueba de Proctor (Crespo, 2004).

Cálculos.

La carga aplicada sobre la muestra se determina con la ecuación 4-27.

$$P = 140.6 \times A \dots\dots (4-27)$$

Donde:

140.6= valor de presión constante (kg/cm^2).

A= Área del molde (cm^2).

P= Carga aplicada al molde (kg).

La altura del suelo compactado se determina con la ecuación 4-28.

$$L2 = L1 - L3 \dots\dots (4-28)$$

Donde:

L1= Altura del molde sin la extensión (cm).

L3= Diferencia de altura promedio de la parte superior del molde al nivel del suelo compactado (cm).

L2= Altura del suelo compactado (cm).

Para determinar el promedio de la diferencia de altura de la parte superior del molde al nivel del suelo compactado se tiene la ecuación 4-29.

$$L3 = \frac{L3' + L3'' + L3''' + L3''''}{4} \dots\dots (4-29)$$

Donde:

L3'= Primera diferencia de altura (cm).

L3''= Segunda diferencia de altura (cm).

L3'''= Tercera diferencia de altura (cm).

L3''''= Cuarta diferencia de altura (cm).

El volumen de suelo compactado dentro del molde se calcula con la ecuación 4-30.

$$Vc = AxL2 \dots\dots (4-30)$$

Donde:

A= Área del molde (cm^2).

L2= Altura del suelo compactado (cm).

Vc= Volumen de suelo compactado (cm^3).

Con la ecuación 4-31 se determina el peso volumétrico húmedo.

$$\gamma m = \frac{Wm}{Vc} \dots\dots (4-31)$$

Donde:

W_m = Peso de la muestra húmeda (gr).

Por último se determina el peso volumétrico seco máximo con la ecuación 4-32.

$$\gamma d \text{ máx} = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{W}{100}} \dots\dots (4-32)$$

Donde:

γ_m = Peso Volumétrico húmedo (gr./) cm^3 .

W = Contenido de agua óptimo (%).

$\gamma d_{\text{máx}}$ = Peso Volumétrico seco máximo (gr./) cm^3 .

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 16

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

“COMPACTACIÓN”.

“PRUEBAS PROCTOR (ESTÁNDAR Y MODIFICADA).”

Práctica No.16

Compactación (Proctor Estándar y Modificada).

Objetivo: Obtener la curva de compactación de un suelo mediante la prueba Proctor Estándar y Modificada realizada en el laboratorio.

Herramienta y Equipo.

- Molde (4") de diámetro interior promedio de 101.6 +/- 0.4mm. Altura de 116.4 +/- 0.5mm. Volumen de 944 +/- 14cm³.

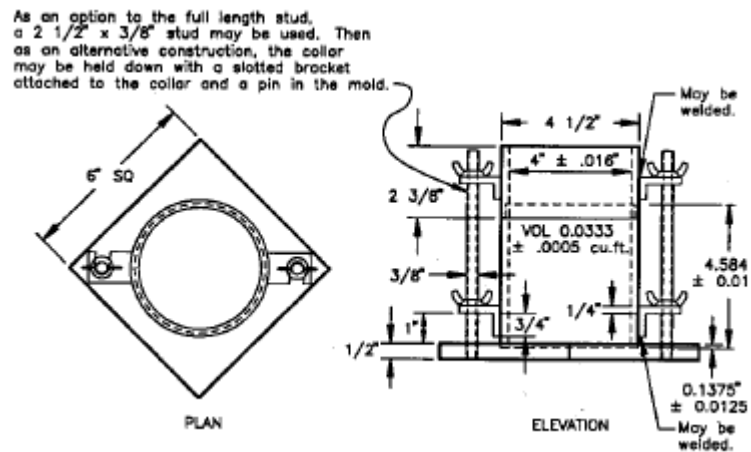


Figura 4.42 Molde cilíndrico de 4" (ASTM D1557-00).

- Molde (6"). Diámetro interior promedio de 152.4 +/- 0.7mm. Altura de 116.4 +/- 0.5mm. Volumen de 2124 +/- 25cm³.

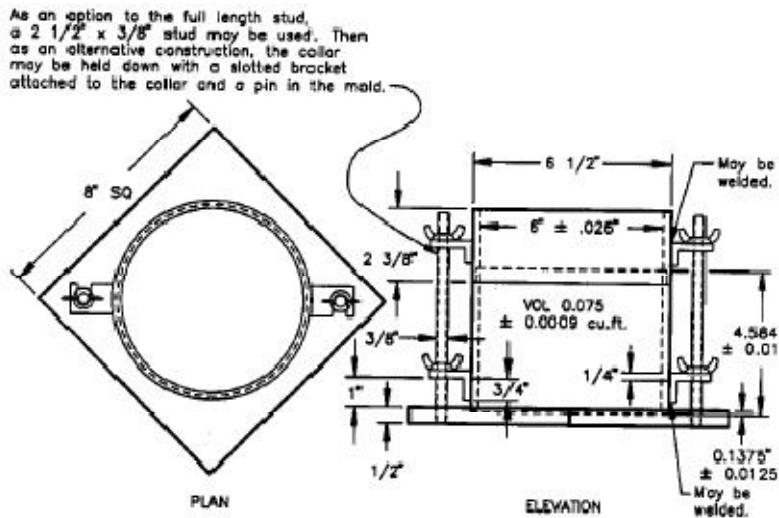


Figura 4.43 Molde cilíndrico de 6" (ASTM D1557-00).

- Pisón Manual Caída libre de 304.8 +/- 1.3mm desde la superficie del espécimen. Masa de 2.5 +/- 0.01kg El área transversal del pistón debe ser circular, con diámetro de 50.80 +/- 0.13mm, y tener una superficie de contacto plana.
- Cucharón de 20 cm de largo, 11cm de ancho y 10 cm de altura.
- Charolas de lámina galvanizada, rectangular de 40x70x10 cm.
- Espátulas.
- Tamices No. 3/4" (19.0mm), 3/8" (9.5mm) y No. 4 (4.75mm).



Figura 4.44 Tamices No.4, 3/4 y 3/8.

- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Balanza con 120 kg de capacidad y aproximación de 10 grs.
- Horno de convección a una temperatura de 105±°C
- Vernier.
- Regla metálica de 30cm de longitud.
- Extractor de muestras.
- Cápsulas de porcelana.
- Mazo de madera con masa de 1 kg de forma prismática rectangular, de 15 cm de altura y 9.5 cm de base por lado.
- Pala de acero de forma rectangular.

Material.

- Muestra de suelo.
- Agua.
- Bolsas de plástico.

Procedimiento.

- 1.- Seleccionar el molde de compactación de acuerdo a los procedimientos descritos.
- 2.- Determinar el peso del molde así como su diámetro y su altura.
- 3.- Armar el molde (base y collar de extensión) y verificar la alineación interna de las paredes del molde.
- 4.- Verificar el peso, la altura de caída y la superficie de contacto del pistón.



Figura 4.45 Pistón.

5.- Tomar la cantidad de suelo para la prueba y colocarlo en una charola metálica. Desmenuzar los grumos del suelo con ayuda del mazo de madera. *Figura 4.46.*



Figura 4.46 Muestra de suelo.

6.- Dividir la muestra en cuatro partes, para así tener material de reserva *Figura 4.47.*



Figura 4.47 Muestra de suelo.

7.- Sin secado previo de la muestra; cribar el suelo con el tamiz No. 4 (4.75mm), 3/8" (9.5mm) o 3/4" (19.0mm), depende del procedimiento (A, B o C) a utilizar *Figura 4.48.*



Figura 4.48 Cribado del suelo.

8.- Tomar una muestra de suelo y colocarla en una cápsula de porcelana de peso conocido y determinar su peso.



Figura 4.49 Peso de la muestra.

9.- Introducir la muestra en el horno hasta su secado y retirar y pesar nuevamente.

10.- Preparar especímenes con contenidos de agua menores y mayores al contenido de agua óptimo estimado. Cinco especímenes son suficientes.

11.- Preparar un espécimen a el cual se le agrega poco a poco agua hasta llegar al contenido de agua cercano al óptimo. Los suelos cercanos al contenido de agua óptimo se aprietan en un terrón con la mano y permanecen en bloque cuando se abre el puño y se rompe limpiamente en dos secciones cuando se flexiona. Los contenidos de agua por abajo del óptimo, el suelo tiende a desmoronarse; por arriba del óptimo el suelo tiende a mantenerse unido formando una masa cohesiva. Comúnmente el contenido de agua óptimo es ligeramente menor al límite plástico.

12.- Para los siguientes cuatro especímenes, seleccionar el contenido de agua de modo que se tengan, por lo menos, dos especímenes por arriba del contenido de agua óptimo y dos especímenes por abajo del contenido de agua óptimo, para definir correctamente la curva de compactación. El contenido de agua puede variar aproximadamente el 2%.

13.- Para cada cantidad de agua agregada se debe mezclar perfectamente el material. El incremento del contenido de agua no debe exceder del 4%.

14.- Adicionar o remover la cantidad de agua requerida. Para añadir agua, rociar agua durante el mezclado del suelo. Para remover agua, permitir que el suelo se seque a temperatura ambiente o en horno de secado, de modo que la muestra no exceda los 60°C. Mezclar el suelo frecuentemente durante el proceso de secado para mantener un contenido de agua uniforme.

15.- Una vez obtenido el contenido de agua deseado introducir el suelo en una bolsa y dejarlo reposar según la *Tabla 4.2*. Para asegurar una distribución uniforme del contenido de agua en todo el espécimen *Figura 4.50*.



Figura 4.50 Muestras con el contenido de agua deseado.

16.- Determinar la masa del molde sin collar, posteriormente armar el molde y el collar.

17.- Usar aproximadamente 2.3 kg de suelo cribado, en cada espécimen a compactar, para el procedimiento A o B y de 5.9 kg para el procedimiento C.

18.- La compactación se realiza por medio de tres capas. Colocar y distribuir uniformemente una capa de suelo dentro del molde *Figura 4.51*.



Figura 4.51 Colocación de la capa de suelo.

19.- Compactar la capa de suelo con 25 golpes para el molde de 4" (101.6mm) o con 56 golpes para el molde de 6" (152.4mm) *Figura 4.52*. Aplicar los golpes a una velocidad de aproximadamente 25 golpes/min y de manera que cubra toda la superficie de la capa.



Figura 4.52 Compactación de la capa de suelo.

20.- Introducir la segunda capa y compactar nuevamente. Colocar la tercera capa de suelo donde exceda ligeramente la altura del molde, pero que no sea mayor a 1/4" (6mm), si excede esta dimensión se desecha el espécimen., tampoco debe quedar por debajo de la altura del molde.

21.-Al final de la última capa, retirar el collar y enrasar el espécimen compactado para formar una superficie plana *Figuras 4.53*.



4.53a - Enrase del espécimen.



4.53b- Superficie plana del espécimen.

Figura 4.53

22.- Determinar el peso del molde con el espécimen.

23.- Retirar la muestra de suelo compactada del molde *Figura 4.54*.



Figura 4.54 Muestra de suelo compactada.

24.- Remover el espécimen para obtener una muestra representativa del centro de aproximadamente 500gr para determinar el contenido de agua *Figura 4.55*.



Figura 4.55 Muestra de suelo removida.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 17

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

“COMPACTACIÓN”.

“PRUEBA PORTER.”

Práctica No.17

Compactación (Prueba Porter).

Objetivo: Determinar el peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) y la humedad óptima del suelo en estudio ($W_{\acute{o}pt}$). Esta prueba se recomienda en suelos friccionantes (gravas y arenas) que pasan la malla de 1"; suelos que comúnmente se utilizan en la construcción de terracerías.

Herramienta y Equipo.

- Molde de compactación.
- Charolas de lámina galvanizada, rectangular de 40x70x10 cm.
- Prensa con 30 tons. de capacidad.
- Placa de carga, con área ligeramente menor a la del molde.
- Horno de convección a una temperatura de $105\pm^{\circ}\text{C}$.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs
- Balanza con 120 kg de capacidad y aproximación de 10 grs.
- Probeta con capacidad de 1000 ml.
- Tamiz de 1"
- Varilla punta de bala de 3/4" de diámetro.
- Vernier.
- Cucharón de 20 cm de largo, 11cm de ancho y 10 cm de altura.
- Cápsula de porcelana.

Material.

- Muestra de suelo.
- Agua.



4.56 Prensa.

Procedimiento.

1. Tomar 4.5 Kg. de suelo, que pasa el tamiz No. 1" .Vaciarse en una charola rectangular y aplicar la cantidad de agua que se considera la óptima. Uniformizar la muestra. Es recomendable que el agua que se va a aplicar al suelo, sea medida en una probeta, para tener una referencia de incremento de agua (aproximadamente 455 a 500 ml).

2. Pesar 500 grs. de suelo húmedo y colocarlo en una cápsula de porcelana de peso conocido (W_h) e introducirlo al horno hasta su secado.
- 3.- Retirar la muestra y pesar nuevamente. Determinar el contenido de agua.
- 4.- Medir el diámetro y altura del molde y determinar su peso con la base y extensión. Calcular el área del molde.
- 5.- Tomar el suelo húmedo restante y colocarlo dentro del molde de compactación en 3 capas, dándole 25 golpes a cada capa con la varilla punta de bala. Retirar el collarín y enrasar.
- 6.-Centrar el molde con la muestra en la prensa y aplicar una presión de 140.6 kg/cm^2 al suelo, para esto, se debe multiplicar ésta presión por el área del molde, dando como resultado una carga (P) = 27,000 Kg. aproximadamente.
- 7.- Esta carga se aplica de la siguiente manera:
 - De 0 a 27 toneladas deben transcurrir 5 minutos.
 - Sostener en 27 toneladas por un minuto y descargar en otro minuto.
- 8.- Al aplicar la carga, observar si la placa que sirve de base del molde se humedeció ligeramente, si así ocurrió, esto indica que el suelo tiene la humedad óptima y la prueba se da por terminada.
- 9.- De quedar la placa inferior seca, se pesan otros 4.5 Kg. de suelo y se repite el proceso, ahora con un 2% más de agua con respecto a la referencia, haciendo todo el proceso antes descrito, hasta que se humedezca la placa inferior. Puede suceder que al compactar el material, expulse agua por los lados, si esto sucede, tomar otra muestra de 4.5 Kg. y aplicar un 2% menos de agua con respecto a la cantidad inicial de referencia.
- 10.- Si la prueba se ejecutó bien, retirar el collarín del molde y medir la diferencia de altura del molde (L_1) y el espécimen. Se deben realizar 4 lecturas, debido a que no resulta una superficie a nivel, y obtener un promedio de las mismas denominado (L_3).
- 11.- Calcular el volumen de suelo compactado con la ecuación 4-30.
- 12.- Calcular el peso volumétrico húmedo (γ_m) con la ecuación 4-31.
- 13.- Calcular el peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{d\text{máx}}$) con la ecuación 4-32.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

4.3.3. CONO DE ARENA “PESO ESPECÍFICO” (ASTM D 1556-00).

Objetivo: Determinar el peso específico seco y el contenido de agua en campo de una capa de suelo previamente compactado.

Introducción.

La calidad durante el proceso de compactación en campo se mide a partir de un parámetro conocido como grado de compactación, el cual representa un cierto porcentaje. Su evaluación involucra la determinación previa del peso específico seco y de la humedad óptima correspondiente a la capa de material previamente compactado. Este método de conocer el grado de compactación es un método destructivo ya que se basa en determinar el peso específico seco de campo a partir del material extraído de una cala, la cual se realiza sobre la capa de material ya compactada.

El cono de arena consiste de un recipiente cilíndrico de metal que continúa hacia abajo con un doble cono, es decir, simétrico con respecto a la válvula, acompañado de una placa metálica con una abertura al centro circular de igual diámetro que la base invertida del cono *Figura 4.57*.

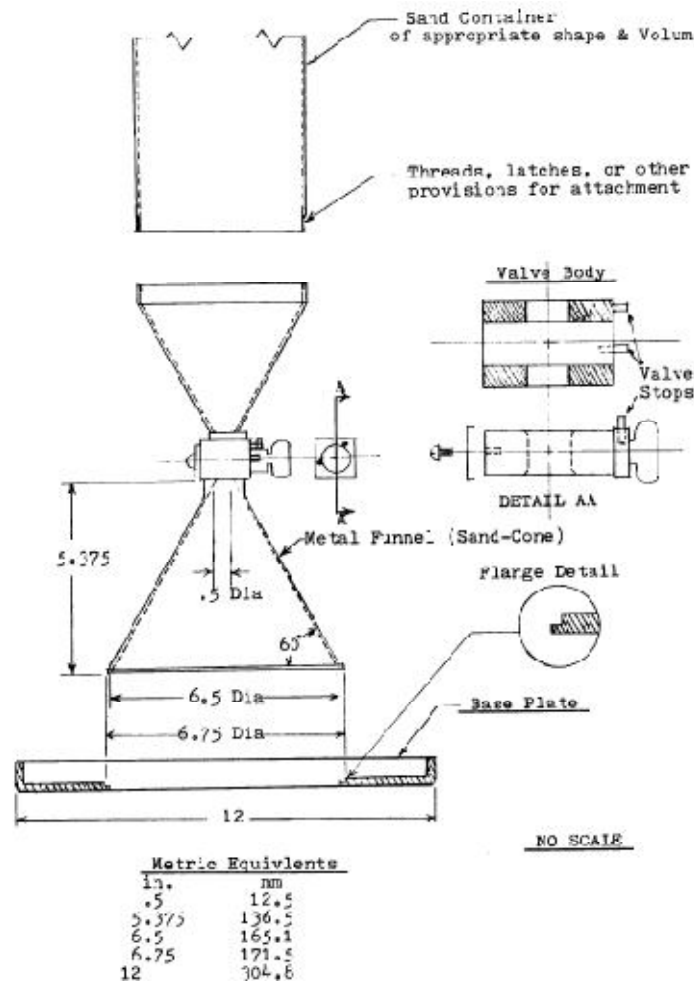


Figura 4.57 Dimensiones del cono de arena (ASTM D1556-00).

En el terreno, se excava un agujero de profundidad que depende de la tabla 4.3 y un diámetro igual a la abertura circular de la placa, la que se coloca horizontalmente sobre la superficie. Esta placa, que tiene rebordes, permite asegurar que no se pierda material en el proceso de excavación, material que deberá ser pesado para obtener su contenido de agua.

Tabla 4.3 Volumen mínimo del agujero basado en el tamaño máximo De las partículas (ASTM D1556-00).

<i>Tamaño máximo de las partículas</i>		<i>Volumen mínimo del agujero</i>	
<i>in.</i>	<i>(mm).</i>	<i>cm3.</i>	<i>ft3</i>
1/2	12.7	1415	0.05
1	25.4	2125	0.075
1 1/2	38	2830	0.1

Uso y significado.

Este método de prueba es aplicable para suelos que no contemplen cantidades de piedra o materiales gruesos mayores a 1 ½ " (3.8 mm) de diámetro.

El material de prueba debe tener cohesión suficiente o atracción de las partículas para mantener los lados estables de la pequeña excavación y debe ser bastante firme para resistir las presiones sobre la excavación al ser colocado el aparato encima de él, sin deformar o desprenderse.

Calibración de la arena.

La arena a emplear en la prueba (sílica u otawa) debe ser calibrada, primeramente se debe cribar por los tamices No.10 y No.60 en el cual no debe pasar o realizar el coeficiente de uniformidad $C_u < 2$ para tener una arena uniforme y de forma sub redondeada.

Posteriormente se lava el material cribado con el tamiz No.200 y se coloca en un recipiente para llevarlo al horno hasta su secado.

Cálculos.

La densidad de la arena se determina con la ecuación 4-33.

$$\rho_1 = \frac{(W_{m+arena}) - W_m}{V_m} \dots\dots\dots (4-33)$$

Donde:

W_m = Peso del molde (gr.).

V_m = Volumen del molde (cm^3).

ρ_1 = Densidad de la arena (gr. / cm^3).

El peso de la arena que se retiene en el cono y la base se determina con la ecuación 4-34.

$$W_c = W_f - W_b \dots\dots\dots (4-34)$$

Donde:

W_f = Peso del frasco lleno de arena y el cono (gr.).

W_b = Peso del frasco con la arena sobrante y el cono (gr.).

W_c = Peso de la arena retenida entre el cono y la base (gr.).

Para determinar el volumen de la excavación realizado se tiene la ecuación 4-35.

$$V = \frac{W_f - W_c - W_e}{\rho_1} \dots\dots\dots (4-35)$$

Donde:

W_e = Peso del frasco con la arena sobrante y el cono después de la prueba (gr.).

ρ_1 = Densidad de la arena (gr. cm^3 /).

V = Volumen de la cavidad (cm^3).

Con la ecuación 4-36 se determina el peso volumétrico húmedo.

$$\gamma_m = \frac{W_f - W_c - W_e}{V} \dots\dots\dots (4-36)$$

Donde:

γ_m = Peso volumétrico húmedo (gr. / cm^3).

Para determinar el peso volumétrico seco se tiene la ecuación 4-37.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{W}{100}} \dots\dots\dots (4-37)$$

Donde:

W= Contenido de agua óptimo (%).

γ_d = Peso Volumétrico seco ($gr./ cm^3$).

El grado o porcentaje de compactación de compactación se determina con la ecuación 4-38, mediante la comparación del peso volumétrico seco en la capa compactada con el peso volumétrico seco máximo Proctor o Porter obtenido en laboratorio.

$$\% \text{ Compactación} = \frac{\gamma_d \text{ en sitio}}{\gamma_d \text{ máx en lab.}} \dots\dots (4-38)$$

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 18

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

“CONO DE ARENA (PESO ESPECÍFICO)”.

Práctica No. 18

Cono de Arena.

Objetivo: Determinar el peso específico seco y el contenido de agua en campo de una capa de suelo previamente compactado.

Herramienta y Equipo.

- Cono de arena (compuesto por una válvula cilíndrica de aproximadamente 13 mm de abertura, con un extremo terminado en embudo y el otro ajustado a la boca de un recipiente de aproximadamente 4 lts. de capacidad).
- Molde de compactación proctor (sin extensión).
- Frasco.
- Flexómetro.
- Vernier.
- Base metálica para el cono.
- Balanza de 20 kg con aproximación de un gramo.
- Charolas de lámina galvanizada, rectangular de 40x70x10 cm.
- Brocha, regla metálica
- Cucharón de 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura.
- Cápsula de porcelana o aluminio.
- Horno de convección a una temperatura de $105\pm^{\circ}\text{C}$.
- Cincel y martillo.
- Bolsas de hule.
- Placa de 10 cm de diámetro.
- Tamices No. 10, No. 60 y No. 200.

Material.

- Arena sílica o de Ottawa.
- Capa de suelo compactado.
- Agua.

Procedimiento.

1.- Determinar el peso del molde (sin la extensión) así como su diámetro interno y su altura.

2.- Determinar el área y el volumen del molde de compactación (V_m).

3.- Introducir en el molde arena (sílica o de otawa) similar a la empleada en campo previamente cribada y uniformizada, con ayuda del cucharón, hasta derramar. Cuidar de no realizar vibraciones sobre el molde por que puede alterar el valor de la densidad de la arena.

4.- Enrasar el molde con ayuda de una regla metálica para evitar ejercer presión y retirar el material sobrante de la base con la brocha.

- 5.- Determinar el peso del molde con la arena ($W_m + \text{arena}$). Realizar los pasos 3 al 5 dos o más veces hasta tener un peso aproximadamente constante.
- 6.- Determinar la densidad de la arena con ayuda de la ecuación 4-33.
- 7.- Llenar el frasco completamente de arena y colocar el cono con la válvula cerrada. Determinar su peso (W_f).
- 8.- Poner la base sobre en la charola y colocar el cono sobre las marcas del orificio de la base. Una vez colocado adecuadamente, abrir la válvula hasta que la arena deje de fluir o deje de moverse dentro del frasco, esto indica que el cono está lleno de arena, cerrar la válvula.
- 9.- Determinar el peso del frasco con el cono y la arena sobrante (W_b). Retirar el material sobrante en la base con la brocha y guardarlo.
- 10.- Calcular el peso de la arena que se quedo retenida dentro del cono y la base (W_c) con la ecuación 4-34.
- 11.- Localizar el lugar donde se llevara a cabo la prueba y realizar una superficie completamente horizontal en el lugar de manera que quepa la base.
- 12.- Colocar la base en la superficie horizontal del lugar y con ayuda del cincel y del martillo remarcar el círculo interior de la base *Figura 4.58*.



Figura 4.58 Remarcación del perímetro del círculo de la base (ingenieracivil.blogspot.com).

- 13.- Retirar la base y remover el material hasta una profundidad tal sea, la que corresponda con los volúmenes de excavación de la tabla 4.3. Retirar y guardar el material extraído en una bolsa de plástico para que no pierda su contenido de agua, tomar una porción de material para determinar el contenido de agua. Determinar el peso del material extraído (W_{sh}).
- 14.- Una vez realizado el agujero, colocar la base fijándola firmemente de manera que no se mueva y que quede a nivel de la superficie horizontal. Realizar con sumo cuidado para procurar la caída o desmoronamiento de las paredes de la pequeña excavación *Figura 4.59*.



Figura 4.59 Posición de la base sobre el agujero y muestra de material en la bolsa de plástico. (ingenieracivil.blogspot.com).

15.- Llenar el frasco completamente de arena, poner el cono con la válvula cerrada y colocarlo en la balanza para determinar su peso (W_f) *Figura 4.60*.



Figura 4.60 Peso del frasco lleno de arena con el cono (ingenieracivil.blogspot.com).

16.- Centrar el cono en el orificio de la base y abrir la válvula para que deje fluir la arena al agujero *Figura 4.61*. Cerrar la válvula hasta que no se presenta movimiento de arena en el interior del frasco.



Figura 4.61 Colocación del cono (ingenieracivil.blogspot.com).

17.- Retirar el cono y determinar su peso con el material sobrante (W_e) *Figura 4.62.*



Figura 4.62 Colocación del cono (ingenieracivil.blogspot.com).

18.- Determinar el volumen de la excavación con la ecuación 4-35.

19.- Determinar el peso específico húmedo del material (γ_m) con la ecuación 4-36.

20.- Determinar el peso específico seco del material (γ_d) con la ecuación 4-37.

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

4.4. RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR) (ASTM D1883-99)

Objetivo: Determinar si el suelo en estudio, tiene la calidad para ser empleado en las capas: base, sub-base y sub-rasante.

Introducción.

En este ensayo se determina la capacidad de soporte CBR de suelos y agregados compactados en laboratorio, con un contenido de agua óptimo y niveles de compactación variables. Este método desarrollado por la división de carreteras del estado de California de los Estados Unidos de América, sirve para evaluar la calidad del suelo para sub-rasante, sub-base y base de pavimentos.

Terminología.

CBR: Es un índice de su resistencia al esfuerzo cortante en condiciones determinadas de compactación y contenido de agua. Se expresa como el porcentaje de la carga necesaria para introducir un pistón de sección circular en una muestra de suelo (Crespo, 2004).

Uso y significado.

El número CBR se basa en la relación de carga para una penetración de 2.54mm, sin embargo, si el valor para una penetración de 5mm es mayor, el ensayo debe repetirse. Los ensayos de CBR se realizan sobre muestras compactadas con un contenido de agua óptimo, que se obtiene de una prueba de compactación proctor.

Antes de la determinación de la tensión de penetración la muestra se debe dejar saturar 96 horas, para la simulación de condiciones de trabajo más desfavorables y para determinar su posible expansión. Para la prueba se confeccionan mínimo 3 probetas, las que se les asignan distintas energías de compactación (con 56, 25 y 10 golpes).

Cálculos.

Calcular la densidad húmeda de la muestra con la ecuación 4-22 luego de ser sumergida.

Calcular la densidad seca de la muestra con la ecuación 4-24.

Calcular la expansión de la muestra, como porcentaje de la altura inicial mediante la ecuación 4-39.

$$E = \frac{Li-Lf}{h} \times 100 \dots\dots\dots (4-39)$$

Donde:

Li= Lectura inicial del comparador dial (mm).

Lf= Lectura final del comparador dial (mm).

h= Altura del espécimen (mm).

E=Expansión de la muestra (%).

Obtener la curva carga-deformación, en el eje de las ordenadas la presión de penetración en MPa y en las abscisas la penetración en mm *Figura 4.63*. En algunos casos la curva puede tomar inicialmente una forma cóncava hacia arriba, debido a irregularidades en la superficie de la probeta. Si ocurre esto, el punto cero se debe corregir con el trazo de una recta tangente a la mayor pendiente de la curva y trasladar el origen al punto donde la tangente corta al eje de las abscisas.

Con los valores de carga tomados de la curva carga-penetración, determinar el CBR (%) para 2.54 y 5mm de penetración, con la división de las cargas normales por 6.9 Mpa y 10.3 Mpa respectivamente y multiplicar por 100.

Dibujar la curva CBR-pd, si el suelo es granular se gráfica la curva con la penetración de 5mm y para suelos finos con 2.54 y 5mm de penetración y determinar el CBR correspondiente para una densidad seca deseada *Figura 4.64*.

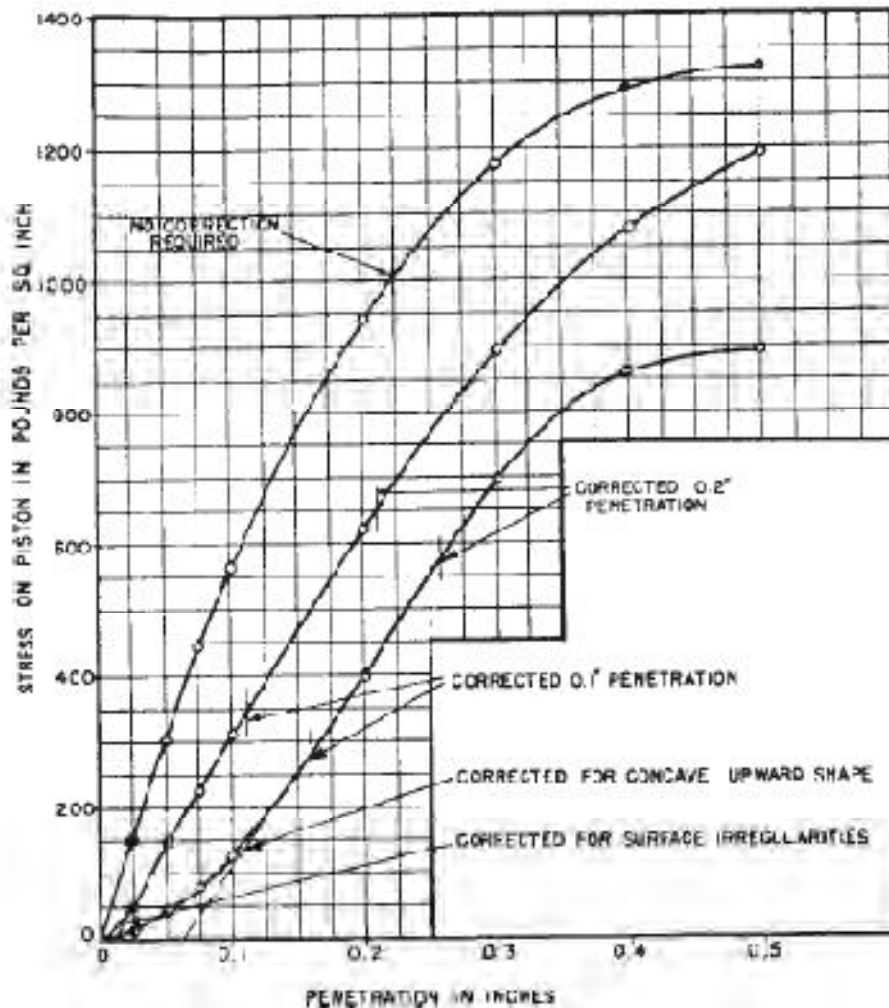


Figura 4.63 Corrección de curva Carga-Penetración (ASTM D 1883-99).

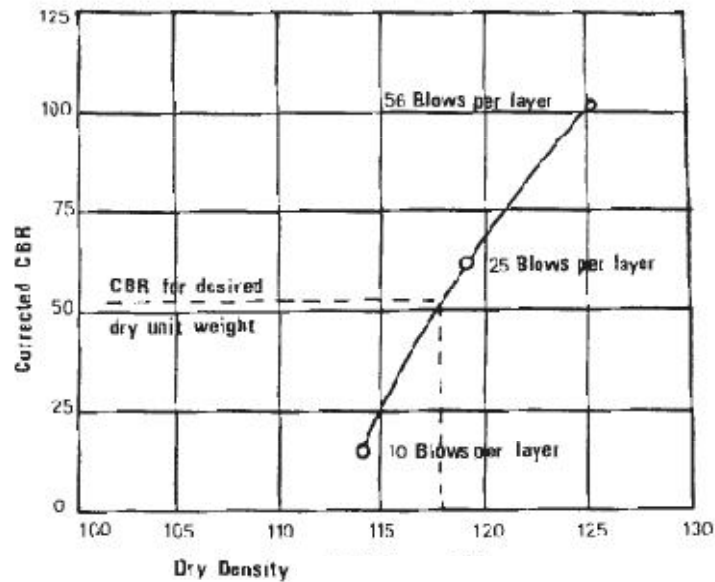


Figura 4.64 Densidad seca- CBR (ASTM D 1883-99).

Con el resultado de la prueba CBR se clasifica el suelo mediante la tabla 4.4, que indica el empleo que le puede dar al material.

Tabla 4.4 Clasificación y uso del suelo según el valor del CBR (Crespo, 2004).

C.B.R.	Clasificación
0 - 5	Subrasante muy mala
5 - 10	Subrasante mala
10 - 20	Subrasante regular a buena
20 - 30	Subrasante muy buena
30 - 50	Sub-base buena
50 - 80	Base buena
80 - 100	Base muy buena

*UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO*



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

PRÁCTICA NÚMERO 19

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

“RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA”.

“CBR.”

Práctica No. 19**Relación de Soporte California (CBR).**

Objetivo: Determinar el Relación de Soporte California para conocer la calidad del suelo en estudio para ser empleado.

Herramienta y Equipo.

- Aparato para medir la expansión, compuesto por una placa metálica provista de un vástago ajustable de metal con perforación de diámetro 1.59 mm y un trípode metálico.
- Presa de ensayo de capacidad mínima de 44 kN y cabezal o base movable a una velocidad de 1.27 mm/min para presionar el pistón de penetración en la probeta.
- Molde metálico cilíndrico de diámetro interior de 152.4 ± 0.66 mm y una altura de 177.8 ± 0.46 mm, con un collarín metálico de extensión de 50.8mm de altura y una placa de 9.5mm de espesor con perforaciones de 1.59mm.
- Disco espaciador cilíndrico, metálico, de 150.8mm de diámetro y 61.37mm de altura.
- Pistón metálico de 49.63mm de diámetro.
- Dos deformímetros comparadores con indicadores de dial de 0.01mm de precisión.
- Pesas metálicas de 2.27 kg cada una y de 149.23mm de diámetro con una perforación central de 53.98mm de diámetro.
- Horno de convección a una temperatura de 105 ± 0.1 °C.
- Balanza de 2 kg de capacidad y aproximación de 0.01 grs.
- Estanque.
- Tamices 3" al No.4.
- Cápsulas de porcelana.
- Vernier.
- Regla metálica.

Material.

- Agua.
- Muestra de suelo.
- Papel filtro.

Procedimiento.

1.- Preparar la muestra de ensaye, como es descrita anteriormente.

2.- Tomar 35 kg de material para realizar la compactación proctor. Dividir el resto de la muestra en tres porciones de 7 kg cada una. Cada porción se debe mezclar con una

cierta cantidad de agua para obtener el contenido de agua óptimo. Si es necesario colocar el suelo dentro de un recipiente para uniformizar el W (%).

3.- Determinar el peso del molde (M_{md}), área y calcular su volumen (V_m).

4.- Compactación de probetas CBR. Colocar el disco espaciador sobre la placa base, fijar el molde con el collarín sobre la placa. El disco queda en el interior del molde. Colocar un disco de papel filtro sobre el disco espaciador.

5.- Introducir la muestra de suelo en el molde. Compactar mediante 5 capas cada una de las porciones de suelo húmedo. Utilizar para cada porción de suelo una energía de compactación distinta, (No. de golpes). Se compactarán con 56, 25 y 10 golpes respectivamente de manera que la densidad a la que se desee determinar el CBR que de comprendida.

6.- Tomar una muestra representativa de suelo para determinar el contenido de agua, esto la comienzo y al final de la prueba. En caso de que las muestras no sean sumergidas, el contenido de agua se determina concluida la penetración.

7.- Una vez compactada la muestra, retirar el collarín y enrasar el suelo al nivel del borde superior del molde, se deben rellenar los huecos que presente la muestra. Retirar la placa base perforada, el disco espaciador y determinar el peso del molde más suelo compactado (W_1).

8.- Colocar un disco de papel filtro sobre la placa base perforada y ajustar el molde con el suelo compactado en forma invertida, de manera que el espacio formado por el disco espaciador quede en la parte superior.

9.- Colocar un disco de papel filtro grueso en la superficie libre de la muestra y sobre éste colocar la placa metálica perforada provista de un vástago regulable. Sobre la placa colocar las sobrecargas cuyo número debe ser especificado (peso del pavimento), de lo contrario se usara la mínima de 4.54 kg.

10.- Cuidadosamente colocar todo el conjunto dentro del estanque sin agua, sobre pequeños bloques con el objeto de permitir el libre acceso del agua por debajo de la muestra. Montar el trípode e instalar el comparador de dial, de modo que su punta toque el vástago.

11.- Llenar el tanque con agua de manera que el tirante quede aproximadamente 2 cm del nivel superior del conjunto. Registrar la lectura inicial del comparador dial (L_i). El tiempo de inmersión dependerá del tipo de saturación. Para un ensayo de saturación normal sumergir el molde durante 96 horas y para una saturación completa se deja hasta que la muestra ya no presente hinchamiento, se comprueba cuando las lecturas del dial efectuadas con 24 horas de intervalo difieren menos de 0.03mm. Durante el tiempo de inmersión el nivel del agua se debe mantener constante.

- 12.- Tomar la lectura final del comparador dial (Lf) según la saturación. Retirar el trípode y sacar el molde, dejarlo drenar durante 15 minutos.
- 13.- Retirar las sobrecargas, los discos de papel y las placas perforadas. Determinar el peso del molde más suelo compactado saturado (Mt).
- 14.- Determinación de la resistencia de penetración. Colocar la probeta sobre la máquina de ensayo y poner una cantidad de cargas para reproducir una sobrecarga igual a la que supuestamente se ejercerá en el material de base y pavimento proyectado. No debe ser menor que 4.54 kg y se coloca en múltiplos de 2.27 kg. Si la probeta fue sumergida se coloca la carga igual a la aplicada durante la inmersión.
- 15.- Colocar el pistón de penetración con la carga más pequeña posible (no debe exceder de 44 N). Posteriormente colocar los diales de lectura de tensión y deformación en cero. La velocidad de carga aplicada al pistón de penetración será de 1.27 mm/min.
- 16.- Tomar las lecturas de carga en los siguientes niveles de penetración 0.64, 1.27, 1.91, 2.54, 3.18, 3.81, 4.45, 5.08, 7.62, 10.16, y 12.70 mm.
- 17.- Una vez tomadas las lecturas, retirar la muestra del molde y tomar una muestra de la capa superior de 25.4mm de espesor para determinar el contenido de agua.
- 18.- Calcular la densidad húmeda con la ecuación 4-22.
- 19.- Determinar la expansión de la muestra con la ecuación 4-39.
- 20.- Obtener la curva de tensión-deformación.
- 21.- Calcular el CBR (%) y determinar la curva CBR-pd.
- 22.- Clasificar el uso del suelo por medio de la tabla 4.4

Una vez realizado el procedimiento anterior se deben vaciar los resultados en la hoja de reporte.

CONCLUSIONES

En este manual se presentan las prácticas de los laboratorios de Comportamiento de los Suelos y de Mecánica de Suelos, así como la calibración de diversos equipos. Estas prácticas se encuentran apegadas a las normas ASTM porque considero que son las más completas para la elaboración de estas pruebas, ya que se tienen diversas normas como las AASHTO las cuales son específicas para caminos y puentes. Se podrían mencionar normas Europeas pero ellas hacen uso de diferentes equipos que no son empleados en nuestro país.

Lo que se toma de las normas mencionadas son especificaciones requeridas o necesarias para la elaboración de las pruebas, ya que hay diferentes maneras o métodos para realizar los ensayos, aquí se presentan los métodos más empleados en los diversos laboratorios de la carrera de Ingeniería Civil.

Este documento lo dirijo a mis compañeros estudiantes de los diversos laboratorios de Mecánica de suelos de la carrera. Se enfoca en llevar a la práctica los conocimientos adquiridos en la teoría de las asignaturas y que sirva de complemento para el desarrollo de las prácticas. Para que el estudiante se vuelva más versátil y pueda determinar un valor determinado con o sin equipo, ya que muchas veces no se tiene el material necesario o no se cuenta con un laboratorio con el equipo suficiente.

También se proponen mas ensayos para que sean realizados dentro del programa de prácticas de los laboratorios.

En este manual se incluyen las hojas de reporte o formatos de los ensayos, (como anexo) donde se muestra, los datos requeridos y sus fórmulas para su obtención. Los ensayos presentan una breve introducción de la prueba en la cual presenta sus términos, usos y cálculos. Posteriormente se tiene la prueba en la que presenta su objetivo principal de la misma (que resultados o valores se van a obtener), el equipo a utilizar, la preparación de la muestra a emplear y un procedimiento claro, ordenado y sencillo.

En el caso de que el lector de este documento necesite o requiera un aspecto más detallado ir a las referencias citadas de este documento.

REFERENCIAS

1. American Society of Testing and Materials (2000), Annual Book of A.S.T.M. Standards, Vol 04.08 Philadelphia, pas.
2. Comisión Nacional del Agua ;(1990),”Mecánica de suelos, Instructivo para ensayos de suelos”, Ed. Colección Breviarios del Agua Serie Educativa. México.
3. Crespo, C;(2004),”Mecánica de suelos y cimentaciones”, 5ta Edición, Ed. Limusa. México.
4. ELE International Ltd;(1968),”División de ensayos de materiales”, Inglaterra.
5. González, L;(2004),”Ingeniería Geológica”, Ed. Pearson Educación. Madrid, España.
6. Juárez, B. E; Rico. A; (1982), “Fundamentos de la Mecánica de Suelos”, Tomo I, Ed. Limusa, México.
7. Mendoza, M.J; Orozco. M; (1995),”Técnicas Alternativas para la Determinación del Límite Líquido de Suelos”, Informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, No 605, México DF.
8. Mendoza, M.J; Orozco. M; (1997),”Técnicas Alternativas para la Determinación del Contenido de Agua de Suelos”, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, No 597, México DF.
9. Pierre, J;(1997),”Experimental Soil Mechanics”, Ed. Prentice Hall. Civil Engineering Department. University of Southern California, Los Angeles.
10. Sánchez, O;(2003),”Revisión Geotécnica de la cimentación de la válvula de 16” en un ducto de Pemex, ubicada en tampamachoco Tuxpan, Veracruz”, Tesis Profesional de Licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
11. Whitlow, R;(1994),”Fundamentos de Mecánica de Suelos”, 1ra Edición en español, Ed. Continental S.A. de C.V. México D.F.

12. Páginas de internet

- <http://www2.ing.puc.cl/~ingeot/ice1603/lab3/lab3.htm>
- www.ucn.cl/.../laboratorio/foto4.jpg
- es.wikipedia.org/wiki/Matraz_aforado
- www.carreras.frba.utn.edu.ar/civil/geotecnia/Informe%20sobre%20Limites%20de%20Atterberg.pdf
- hidram.epfl.ch
- www.fing.edu.uy/iet/areas/geotecnia/cursos/mec_suelos/teorico_2007/prop_hidraulicas_4.ppt
- ingenieracivil.blogspot.com

ANEXO I

HOJAS DE REPORTE DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

CAPÍTULOS 1 Y 2.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
 LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE SUELOS
PRUEBA DE CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN VISUAL DE SUELOS

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____ MUESTRA No. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____
 MASA TOTAL DE LA MUESTRA (g) _____

IDENTIFICACIÓN DE SUELOS FINOS

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA FINA (COLOR, OLOR, TEXTURA, ETC.) _____

Tabla I.1 Identificación de Suelos Finos

Nombre	Resistencia en estado seco	Dilatancia	Tenacidad	
Limo Arenoso	De ninguna a muy baja	Rápida	Débil o baja	DILATANCIA _____
Limo	De muy baja a baja	Rápida	Débil a baja	TENACIDAD _____
Limo Arcilloso	De baja a media	Rápida a lenta	Media	RESISTENCIA EN
Arcilla Arenosa	De baja a alta	De lenta a ninguna	Media	ESTADO SECO _____
Arcilla Limosa	De media a alta	De lenta a ninguna	Media	
Arcilla	De alta a muy alta	Ninguna	Alta	NOMBRE _____
Limo Orgánico	De baja a media	Lenta	Débil a baja	
Arcilla Orgánica	De media a alta	Ninguna	Alta	

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

DATOS DE LA PRUEBA.

Tabla I.2 Clasificación de Grupos

GRUPOS	GRUPOS
GRAVAS	ARENAS
GW	SW
GP	SP
GW-GM	SW-SM
GW-GC	SW-SC
GP-GM	SP-SM
GP-GC	SP-SC
GM	SM
GC	SC
GC-GM	SC-SM

Número del Tamiz ASTM	Abertura del Tamiz	Peso Retenido	% Retenido	% Que Pasa	GRUPO _____
	(mm)	(g)			
3"	75.000				
2"	50.800				
1 1/2"	38.100				
1"	25.400				
3/4"	19.000				
1/2"	12.700				
3/8"	9.500				
1/4"	6.350				
No. 4	4.750				
No. 10	2.000				
No. 20	0.850				
No. 40	0.425				
No. 60	0.250				
No. 100	0.150				
No.200	0.075				

OBSERVACIONES: _____



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS
CALIBRACIÓN DEL HIDRÓMETRO

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 HIDRÓMETRO No. _____ A _____ cm²
 PROBETA 1000 CM³ No. _____ PROBETA 500 CM³ No. _____ VH _____ cm³

COMPROBACIÓN DE LA ESCALA DEL HIDRÓMETRO.

Matraz No.	W Matraz (gr.)	Sal (gr.)	Peso Sol. + W Matraz (gr.)	Peso Solución (gr.)	Volumen Solución (cm ³)	gm (gr./cm ³)	Lecturas Hidrómetro (cm)	Ws (gr.)
		8						
		16						
		24						

RH	H1 (cm)	H (cm)
0		
10		
20		
30		
40		
50		
60		

N _____ cm

CORRECCIÓN POR MENISCO Cm (+)

Lectura Abajo = _____
 Lectura Arriba = _____
 Cm = _____ cm

CORRECCIÓN POR DEFLOCULANTE Cd (-)

Lectura Agua + Defloculante = _____
 Lectura Agua = _____
 Cd = _____ cm
 Defloculante Empleado: _____

Fórmulas $\gamma_m = \frac{\text{Peso Solución}}{\text{Volumen Solución}}$

$$W_s = \frac{1000 (\gamma_m - 1) G_s}{G_s - 1}$$

$$H = H1 + \frac{1}{2} \left(h - \frac{VH}{A} \right)$$

$$Vol. Sol. = \frac{\text{Peso del agua que llena el matraz}}{\text{Peso volumétrico del agua a la temperatura de operación}}$$

gm = Peso Vol. de la suspensión (gr/cm³).
 Gs = Densidad de sólidos

H1 = Distancia de la parte superior del bulbo a la marca de graduación registrada (cm).
 VH = Volumen del bulbo del hidrómetro (cm³).
 A = Área de la sección transversal hueca de la probeta (cm²).

OBSERVACIONES: _____

ANEXO II

HOJAS DE REPORTE DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

CAPÍTULOS 3 Y 4.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS**

CONTENIDO DE AGUA

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 PERFORACIÓN No. _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA (SUELO 1).

Tara No. _____
 Wr _____ gr.
 Wr+Sh _____ gr.
 Wr+Ss _____ gr.
 Ww _____ gr.
 Ws _____ gr.

 W _____ %

$$W(\%) = \left[\frac{(W + Sh - Wr + Ss)}{(Wr + Ss - Wr)} \right] \times 100 = \frac{Ww}{Ws} \times 100$$

W=contenido de agua (%).
 Ww=Peso del agua (gr) $Ww = Wr + Sh - Wr + Ss$
 Ws=Peso del suelo (gr) $Ws = Wr + Ss - Wr$
 Wr+Sh=Peso de la tara más suelo húmedo (gr).
 Wr+Ss=Peso de la tara más suelo seco (gr).
 Wr=Peso de la tara (gr).

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA (SUELO 2).

Tara No. _____
 Wr _____ gr.
 Wr+Sh _____ gr.
 Wr+Ss _____ gr.
 Ww _____ gr.
 Ws _____ gr.

 W _____ %

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA (SUELO 3).

Tara No. _____
 Wr _____ gr.
 Wr+Sh _____ gr.
 Wr+Ss _____ gr.
 Ww _____ gr.
 Ws _____ gr.

 W _____ %

OBSERVACIONES: _____



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

PESO ESPECÍFICO O DENSIDAD DE SÓLIDOS PARA SUELOS FINOS

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 PERFORACIÓN No. _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE SÓLIDOS.

Matraz N°. _____
 Wcáp. _____ gr.
 Wcáp.+suelo _____ gr.
 Ws _____ gr.
 Wfws _____ gr.
 Temperatura _____ °C
 Wfw _____ gr.
 Ws+Wfw-Wfws _____ gr.
 Gs _____

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{fw} - W_{fws}}$$

Ws =Peso del suelo seco
 Wfws=Peso del matraz+agua+suelo
 Wfw=Peso del matraz lleno de agua

Matraz N°. _____
 Wcáp. _____ gr.
 Wcáp.+suelo _____ gr.
 Ws _____ gr.
 Wfws _____ gr.
 Temperatura _____ °C
 Wfw _____ gr.
 Ws+Wfw-Wfws _____ gr.
 Gs _____

OBSERVACIONES: _____



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS**

PESO ESPECÍFICO O DENSIDAD DE SÓLIDOS PARA SUELOS GRUESOS

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 PERFORACIÓN No. _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE SÓLIDOS.

Wcápsula _____ gr.
 Wcápsula + grava húmeda _____ gr.
 Peso grava húmeda _____ gr.
 Volumen de agua
 introducido en la probeta _____ cm³
 Volumen desalojado (Vs) _____ cm³
 Peso grava seca (Ws) _____ gr.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$$

Ws =Peso de la grava seca.
 Vs=Volumen de los sólidos.
 gw= Peso específico del agua.
 gw= 1 gr/cm³

Gs _____ gr./cm³

OBSERVACIONES: _____



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS**

RELACIÓN DE VACÍOS Y POROSIDAD

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE VACÍOS.

Wvaso _____ gr.
 Volumen del vaso (Vm) _____ cm3.
 Wvaso+suelo _____ gr.
 Ws _____ gr.
 Wvaso+suelo+agua (Wm) _____ gr.
 Vv _____ cm3.
 Vs _____ cm3.
 e _____

$$V_v = W_m - (W_{vaso} + W_s)$$

$$V_s = V_m - V_v$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Ws =Peso del suelo seco.

Wm=Peso del vaso+agua+suelo.

Vm=Volumen del vaso.

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD.

n _____ %.

$$n = \frac{V_v}{V_m} \cdot 100$$

DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE LA MASA DE SUELO.

Wm _____ gr.
 Vm _____ cm3.
 γm _____ gr/cm3.

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_m}$$

OBSERVACIONES: _____



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS
PESOS VOLUMÉTRICOS**

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO.

$$D_{geom} = \frac{D_s + 4D_m + D_i}{6}$$

Wcáp. _____ gr.
 Wcáp. + suelo húmedo. _____ gr.
 Wcáp. + suelo seco. _____ gr.
 Ws _____ gr.
 Ds. _____ cm.
 Dm. _____ cm.
 Di. _____ cm.
 D geom. _____ cm.
 h1 _____ cm.
 h2 _____ cm.
 h3 _____ cm.
 H prom. _____ cm.
 Vm. _____ cm³.
 gd _____ gr./cm³.

D geom= Diámetro geométrico.
 Ds= Diámetro superior.
 Dm= Diámetro medio.
 Di= Diámetro inferior.

$$H_{prom} = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}$$

H prom.= Altura promedio.
 h1=Altura a 120°
 h2=Altura a 240°
 h3=Altura a 360°

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

DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SUMERGIDO PLASTIPACK gd= Peso específico seco.

Wsumergido _____ gr.
 Vm _____ cm³.
 gm _____ gr/cm³.

Ws= Peso de los sólidos.
 Vm= Volumen de la muestra.

$$\gamma'_m = \gamma_m - \gamma_w$$

gm= Peso específico sumergido.
 gm= Peso específico de la masa de suelo.
 gw= Peso específico del agua.

**DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SUMERGIDO
FORMA ANALÍTICA.**

Wm _____ gr.
 Vm _____ cm³.
 gm _____ gr/cm³.
 gw _____ 1 gr/cm³.
 gm _____ gr/cm³.

OBSERVACIONES: _____



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS
PESOS VOLUMÉTRICOS POR MEDIO DE CERA

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DE LA CERA.

$$\gamma_p = \gamma_w \frac{W_2}{W_1 + W_2 - W_3}$$

W1	_____ gr.	
W2	_____ gr.	W1=Peso sumergido del bloque de metal.
W3	_____ gr.	W2=Peso del bloque de cera.
yw	_____ gr/cm3.	W3=Peso del metal y la cera.
yp	_____ gr/cm3.	γw= Peso específico del agua. γp= Peso específico de la cera.

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA.

$$W(\%) = \left[\frac{(W + Sh - Wr + Ss)}{(Wr + Ss - Wr)} \right] \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Wr+Sh	_____ gr.	
Wr+Ss	_____ gr.	Wr+Sh=Peso de la muestra de suelo húmeda más el plato o tara.
Ww	_____ gr.	Wr+Ss=Peso de la muestra de suelo seca más el plato o tara.
Ws	_____ gr.	Wr=Peso del plato o tara
Wr	_____ gr.	W=Contenido de agua.
W	_____ %.	

DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + W}$$

γ	_____ gr.	
W	_____ cm3.	W= Contenido de agua.
γd	_____ gr/cm3.	γ= Peso específico de la masa de suelo. γd= Peso específico seco.

DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SUMERGIDO.

$$\gamma = \gamma_w \frac{W}{W_p - W_l - \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_p}\right)(W_p - W)}$$

W	_____ gr.	
Wp	_____ gr.	W=Peso de la muestra.
Wl	_____ gr.	Wp=Peso de la muestra encerada.
yw	_____ gr/cm3.	Wl=Peso de inmersión de la muestra de suelo encerada.
γd	_____ gr/cm3.	γw= Peso específico del agua.
γ	_____ gr/cm3.	γd= Peso específico seco.

OBSERVACIONES: _____



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS**

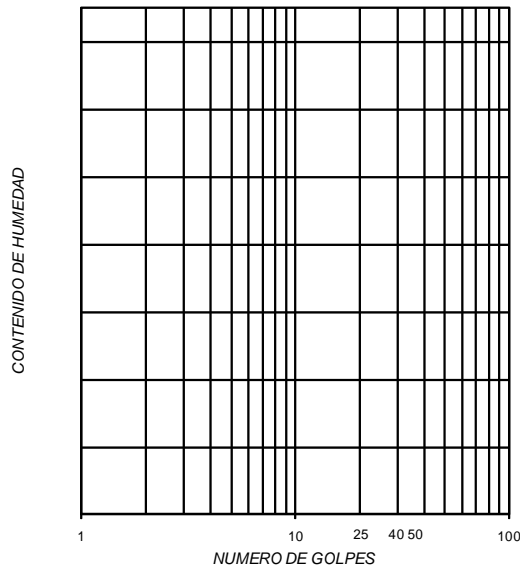
LÍMITE LÍQUIDO POR EL MÉTODO DE LA COPA DE CASAGRANDE

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO.

Prueba	Cápsula	W Cápsula	Número de golpes	Wcáp + Sh	Wcáp + Ss	Peso del agua	Peso del suelo	Contenido de Agua
No.	No.	gr.		gr.	gr.	gr.	gr.	W (%)

CURVA DE FLUIDEZ



WL (%) _____
 A los 25 golpes / segundo.

OBSERVACIONES: _____



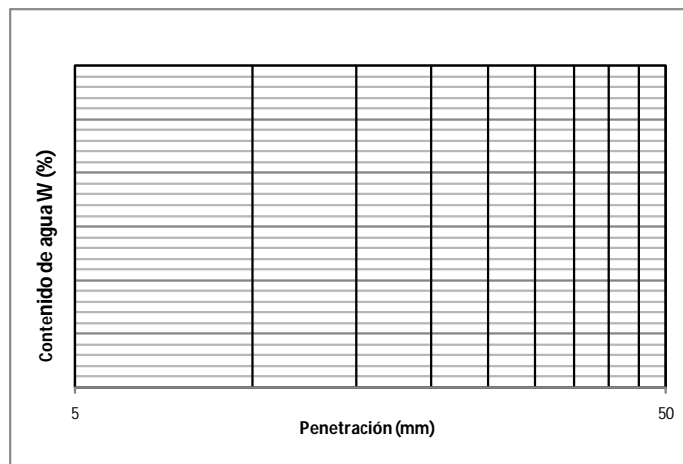
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS
LÍMITE LÍQUIDO POR EL MÉTODO DEL CONO SUECO

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO.

Prueba	Cápsula	W Cápsula	Penetración	Wcáp + Sh	Wcáp + Ss	Peso del agua	Peso del suelo	Contenido de Agua
No.	No.	gr.	mm.	gr.	gr.	gr.	gr.	W (%)

CURVA DE FLUIDEZ



WL (%) _____
 A los 10mm de penetración.

OBSERVACIONES: _____



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS**

LÍMITE PLÁSTICO

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO.

Muestra No.	1	2	3
Wcáp. + Shúmedo.			
Wcáp. + Sseco.			
Wcáp.			
W Suelo seco.			
Peso agua.			
W %			

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

Muestra No.	
Wcáp. + Shúmedo.	
Wcáp. + Sseco.	
Wcáp.	
W Suelo seco.	
Peso agua.	
W NATURAL %	

Límite Plástico (WP) _____ %
 Límite Líquido (WL) _____ % Determinado en la prueba anterior
 Índice de Plasticidad (PI) _____
 Índice líquido (LI) _____
 Índice de Consistencia (CI) _____
 SUCS _____

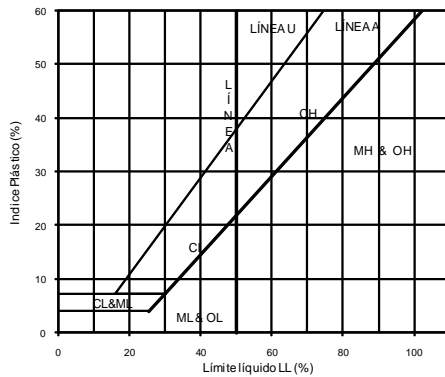
$$PI = WL - WP$$

WL= Límite Líquido.
 WP= Límite Plástico.

$$LI = \frac{(W - WP)}{PI}$$

W= Contenido de agua natura
 PI= Índice de Plasticidad.

$$CI = \frac{(WL - W)}{PI}$$



OBSERVACIONES: _____



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS**

LÍMITE DE CONTRACCIÓN

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 PERFORACIÓN No. _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN

Muestra No.	1	2	3	4	5
Petri No.					
Peso del petri					
Peso del petri + suelo húmedo					
Peso del petri + suelo seco					
Peso del suelo seco					
Peso del agua					
Contenido de agua (%)					
Peso del petri + mercurio					
Peso del vasito de cristal + mercurio					
Peso del vasito de cristal + mercurio remanente					
Peso mercurio derramado					
Volumen del suelo seco					
Volumen del suelo húmedo					

Densidad del mercurio 13.55 gr./cm³

Contenido de agua natural _____ %

Límite de contracción (SL) _____ %

Relación de contracción _____ cm³

$$LC = W_i - \frac{V_i - V_f}{W_s}$$

$$R = \frac{W_s}{V_s}$$

W_i= Contenido de agua natural.

W_s= Peso del suelo seco.

V_i= Volumen de la pastilla de suelo húmedo.

V_s= Volumen de la pastilla de suelo seco.

V_f= Volumen de la pastilla de suelo seco.

W_s= Peso del suelo seco.

$$LC (\%) = \frac{(L_o - L_f)}{L_o}$$

Contracción Lineal _____ %

L_o= Longitud inicial de la barra de suelo húmedo

(equivale a la longitud del molde).

L_f = Longitud final de la barra de suelo seco.

OBSERVACIONES: _____



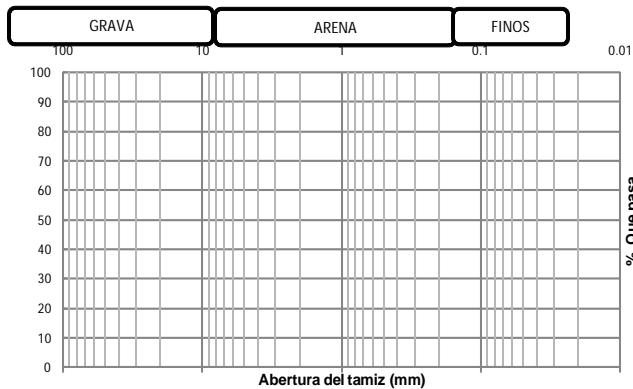
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN

LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS
GRANULOMETRÍA POR TAMICES.

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____
 MASA TOTAL DE LA MUESTRA (gr) _____

Malla	Abertura en mm.	Peso Retenido gr.	% Parcial Retenido	% Acumulativo que pasa	Observaciones
3					Análisis efectuado con la muestra total de _____
2"					
1½"					Humedad testigo Grava w = _____ % Arena w = _____ %
1"					
¾"					
½"					
3/8"					
Nº 4					% material menor que la malla No. 4
Sumas =					% de grava
% Acumulativo que pasa de la malla No. 4 de la muestra total					Observaciones
10					Análisis efectuada con muestra de _____ del material menor que la malla No.4
20					
40					
60					
100					
200					% Material fino menor que 200
Suma=					Observaciones:
Charola					GW > 4 ÷ 1 y 3
Sumas =				Revisar con muestra seca	SW > 6 ÷ 1 y 3

CURVA GRANULOMÉTRICA



D10 = _____

D30 = _____

D60 = _____ $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Cu = _____

Cc = _____ $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$

Grava = _____ %

Arena = _____ %

Finos = _____ %

Clasificación SUCS _____

OBSERVACIONES: _____



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS
GRANULOMETRÍA POR EL MÉTODO DEL HIDRÓMETRO.

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____ MUESTRA No. _____ PROF. / ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____
 MASA TOTAL DE LA MUESTRA (gr) _____

PROBETA 1000 CM3 No. _____ PROBETA 500 CM3 No. _____ VH _____ cm3
 HIDRÓMETRO No. _____ Gs _____ A _____ cm2

CORRECCIÓN POR MENISCO Cm (+)	
Lectura Abajo =	
Lectura Arriba =	
Cm=	cm

CORRECCIÓN POR DEFLOCULANTE Cd (-)	
Lectura Agua + Defloculante =	
Lectura Agua =	
Cd	cm
Defloculante Empleado;	

Fecha	Hora	Tiempo transcurrido (min)	Temperatura (°C)	Lectura del hidrometro corregida H	RH=H+Cm (L)	Diámetro (mm)	Corrección por temperatura (mT)	Rc=mT-Cd	% retenido en suspensión
		0.5							
		1							
		2							
		5							
		15							
		30							
		60							
		120							
		240							
		1440							

$$D = k \sqrt{\frac{L}{t}}$$

D=Diámetro de la esfera (mm).
 K= Constante que depende de la temperatura y gravedad específica del suelo usado.
 L=Altura efectiva de caída corregida por menisco (cm).
 t=Tiempo (min).

$$P = \frac{Rca}{Ws} \times 100$$

P=Porcentaje de suelo retenido en suspensión.
 Rc=Lectura corregida del hidrómetro.
 a=Factor de corrección de la densidad de sólidos.
 Ws=Peso de la muestra seca utilizado en el ensayo.

$$Rc = mT - Cd$$

mT= Corrección por temperatura.
 Cd=Corrección por defloculante.

OBSERVACIONES: _____



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN
LABORATORIO DE COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

CONSOLIDACIÓN

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 PERFORACIÓN No. _____ MUESTRA No. _____ PROF./ ELEV. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

Determinación del W (%)	Antes de la consolidación		Después de la consolidación	
No. Cápsula				
W cáp. (gr.)				
W cáp. + Sh (gr.)				
W cáp. + Ss (gr.)				
W agua (gr.)				
W Suelo seco (gr.) Ws				
Contenido de agua W (%)	W1=	W1=	W2=	W2=
W (%) Promedio	W1=		W2=	

Brazo de palanca

Chico (cm)= _____

Grande (cm)= _____

Factor de carga _____

Anillo					Muestra			Gs
Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (gr.)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Vm (cm ³)	Wm (gr.)	γ (gr./cm ³)	(gr./cm ³)

Tabla de consolidación

Carga (gr.) _____ Día _____
 Presión (kg/cm²) _____ Hora de inicio de la prueba _____

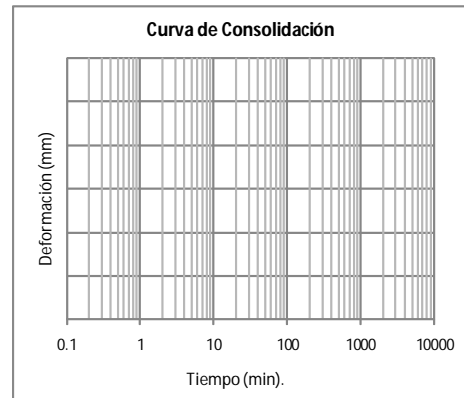
$$C_v = \frac{0.197H^2m}{t_{50}}$$

Cv= _____ cm²/seg.

Hm= _____ cm.

t₅₀= _____ min.

Tiempo (seg)	Tiempo (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Deformación acumulada (mm)
0	0			
6	0.1			
15	0.25			
30	0.5			
60	1			
120	2			
240	4			
480	8			
900	15			
1800	30			
3600	60			
7200	120			
14400	240			
28800	480			
86400	1440			



OBSERVACIONES: _____



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

COMPACTACIÓN PROCTOR

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 MUESTRA No. _____ CAPA No. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

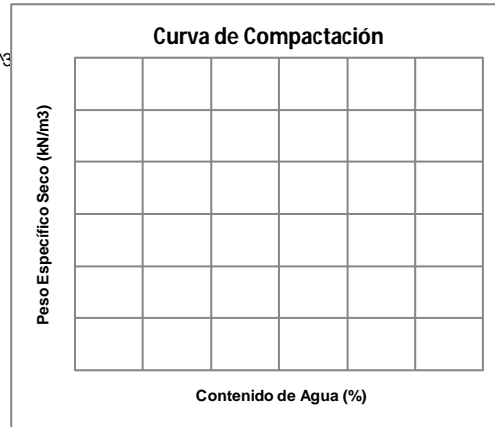
TIPO DE PRUEBA: _____

ENERGÍA ESPECÍFICA DE COMPACTACION = _____ kg - cm/cm³
 _____ kN - m/m³

PESO DEL MARTILLO = _____ kg
 ALTURA DE CAIDA = _____ cm

No. DE CAPAS = _____
 No. DE GOLPES POR CAPA = _____

MOLDE No.: _____
 MASA DEL MOLDE (M_{md}) = _____ kg
 Altura promedio (h) = _____ mm
 Diámetro promedio superior (d_t) = _____ mm
 Diámetro promedio inferior (d_b) = _____ mm
 VOLUMEN DEL MOLDE (V) = _____ m³



DETERMINACIÓN No.	UNIDADES	1	2	3	4	5	6
MASA DEL MOLDE + SUELO HUMEDO (M _t)	kg						
DENSIDAD HUMEDA (r _m)	Mg/m ³						
CAPSULA No.							
W _{CAP}	g						
W _{CAP + SH}	g						
W _{CAP + SS}	g						
CONTENIDO DE AGUA (w)	%						
DENSIDAD SECA (r _d)	Mg/m ³						
PESO VOLUMETRICOS SECO (γ _s)	kN / m ³						

$$\rho_m = \frac{(M_t - M_{md})}{1000V}$$

$$V = \frac{\pi h (d_t + d_b)^2}{16(10^9)}$$

ρ_d = Densidad seca del espécimen compactado (Mg/m³).
 ρ_m = Densidad húmeda del espécimen compactado (Mg/m³).
 W = Contenido de agua (%).

ρ_m = Densidad húmeda del espécimen compactado (Mg/m³). V = Volumen del molde (m³).
 M_t = Masa del espécimen compactado más el molde (kg). h = Altura promedio (mm).
 M_{md} = Masa del molde (kg). d_t = Diámetro promedio superior (mm).
 V = Volumen del molde de compactación (m³). d_b = Diámetro promedio inferior (mm).

1/10⁹ = Constante para transformar de mm³ a m³.

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{w}{100}} \quad \gamma_d = 9.807 \rho_d$$

γ_d = Peso volumétrico seco del espécimen compactado (kN/m³).
 9.807 = Aceleración gravitacional.

OBSERVACIONES: _____



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

COMPACTACIÓN PORTER

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 MUESTRA No. _____ CAPA No. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

Molde No. _____
 Peso del molde (Wmolde) _____ gr. $P = 140.6 \times A$
 Diámetro del molde (\emptyset) _____ cm
 Altura del molde sin extensión (L1) _____ cm $A = \text{Área del molde (cm}^2\text{)}$
 Área del molde (a) _____ cm² $P = \text{Carga aplicada al molde (kg)}$
 Volumen del molde (Vm) _____ cm³

$$L_3 = \frac{L_3' + L_3'' + L_3''' + L_3''''}{4}$$

 Valor de carga (cte) _____ 140.6 kg/cm²
 Carga aplicada (P) _____ kg
 L3' = Primera diferencia de altura (cm).
 L3'' = Segunda diferencia de altura (cm).
 L3''' = Tercera diferencia de altura (cm).
 L3'''' = Cuarta diferencia de altura (cm).

$$L_2 = L_1 - L_3$$

 Diferencia de altura (L3') _____ cm
 Diferencia de altura (L3'') _____ cm
 Diferencia de altura (L3''') _____ cm
 Diferencia de altura (L3''') _____ cm
 Diferencia de altura promedio (L3) _____ cm
 L1 = Altura del molde sin la extensión (cm).
 L3 = Diferencia de altura promedio de la parte superior del molde al nivel del suelo compactado (cm).
 L2 = Altura del suelo compactado (cm).
 Altura del suelo compactado (L2) _____ cm

DETERMINACIÓN No.	UNIDADES.	1	2	3	4	5
Cápsula No.	gr.					
Peso de la cápsula (Wr)	gr.					
Peso de la cápsula + Suelo húmedo (Wr+Sh)	gr.					
Peso de la cápsula + Suelo seco (Wr+Ss)	gr.					
Peso del agua (Ww)	gr.					
Peso de los sólidos (Ws)	gr.					
Contenido de agua óptimo (%)	%					
Peso del suelo húmedo (Wm)	gr.					
Volumen de suelo compactado (Vc)	cm ³					
Peso volumétrico húmedo (γ_m)	gr./cm ³					
Peso volumétrico seco máximo ($\gamma_d \text{ máx}$)	gr./cm ³					

$V_c = A * L_2$ $\gamma_m = \frac{W_m}{V_c}$ $\gamma_d \text{ máx} = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{W}{100}}$

A= Área del molde (cm²). Wm= Peso de la muestra húmeda (gr). γ_m = Peso Volumétrico húmedo (gr./cm³).
 L2= Altura del suelo compactado (cm). γ_m = Peso Volumétrico húmedo (gr./cm³). W= Contenido de agua óptimo (%).
 Vc= Volumen de suelo compactado (cm³). $\gamma_d \text{ máx}$ = Peso Volumétrico seco máximo (gr./cm³).

OBSERVACIONES: _____



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

CONO DE ARENA

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 MUESTRA No. _____ CAPA No. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

CALIBRACIÓN EN LABORATORIO.

Molde No. _____	Molde No. _____
Peso del molde (Wm) _____ gr.	Peso del molde (Wm) _____ gr.
Diámetro del molde (Ø) _____ cm	Diámetro del molde (Ø) _____ cm
Altura del molde sin extensión (L1) _____ cm	Altura del molde sin extensión (L1) _____ cm
Área del molde (a) _____ cm ²	Área del molde (a) _____ cm ²
Volumen del molde (Vm) _____ cm ³	Volumen del molde (Vm) _____ cm ³
Peso del molde + arena _____ gr.	Peso del molde + arena _____ gr.

Peso del molde + arena (Promedio) _____ gr.	$\rho_1 = \frac{(Wm + arena) - Wm}{Vm}$ Wm= Peso del molde (gr.). Vm=Volumen del molde (cm3). ρ1= Densidad de la arena (gr. /cm3).
Densidad de la arena _____ gr/cm3	

Peso del frasco+cono y arena (Wf) _____ gr.	$Wc = Wf - Wb$ Wf= Peso del frasco lleno de arena y el cono (gr.). Wb=Peso del frasco con la arena sobrante y el cono (gr.). Wc= Peso de la arena retenida entre el cono y la base (gr.).
Peso del frasco+cono y arena sobrante (Wb) _____ gr.	
Peso de la arena retenida entre el cono y la base (Wc) _____ gr.	

MEDIDAS EN CAMPO.

Diámetro del agujero _____ cm.	Peso del frasco lleno de arena + cono antes de la prueba (Wf) _____ gr.
Área del agujero _____ cm ² .	Peso del frasco+cono y arena sobrante después de la prueba (We) _____ gr.
Volumen mínimo del agujero de tabla 0. _____ cm ³ .	
Profundidad del agujero. _____ cm.	
Peso del material extraído (Wsh). _____ gr.	Volumen del agujero (V) _____ cm ³ .

DETERMINACIÓN No.	UNIDADES.	1	2
Cápsula No.	gr.		
Peso de la cápsula (Wr)	gr.		
Peso de la cápsula + Suelo húmedo (Wr+Sh)	gr.		
Peso de la cápsula + Suelo seco (Wr+Ss)	gr.		
Peso del agua (Ww)	gr.		
Peso de los sólidos (Ws)	gr.		
Contenido de agua óptimo (%)	%		
Peso Volumétrico húmedo del material	gr./cm ³ .		
Peso Volumétrico Seco del material (γd)	gr./cm ³ .		

$$V = \frac{Wf - Wc - We}{\rho_1}$$

We=Peso del frasco con la arena sobrante y el cono después de la prueba (gr.).
 ρ1= Densidad de la arena (gr. /cm3).
 V=Volumen de la cavidad (cm3).

$$\gamma_m = \frac{Wf - Wc - We}{V}$$

γm= Peso volumétrico húmedo (gr./cm3).

$$\gamma_{dl} = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{W}{100}}$$

W= Contenido de agua óptimo (%).
 γd= Peso Volumétrico seco (gr./cm3).

OBSERVACIONES: _____



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 MUESTRA No. _____ CAPA No. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

ENERGÍA ESPECIFICA DE COMPACTACION = _____ kg - cm/cm³
 _____ kN - m/m³
 PESO DEL MARTILLO = _____ gr.
 ALTURA DE CAIDA = _____ gr.
 No. DE CAPAS = _____ 5 _____

$$V = \frac{\pi h (d_t + d_b)^2}{16 (10^9)}$$

MOLDE No.: _____
 MASA DEL MOLDE (M_{md}) = _____ gr.
 Altura promedio (h) = _____ mm
 Diámetro promedio superior (d_t) = _____ mm
 Diámetro promedio inferior (d_b) = _____ mm
 VOLUMEN DEL MOLDE (V) = _____ cm³

V = Volumen del molde (m³)
 h = Altura promedio (mm)
 d_t = Diámetro promedio superior (mm)
 d_b = Diámetro promedio inferior (mm)
 1/10⁹ = Constante para transformar de mm³ a m³.

DETERMINACIÓN No.	UNIDADES	1	2	3
GOLPES POR CAPA	No.	56	25	10
W MOLDE + SUELO (W1)	gr.			
W MOLDE + SUELO HUMEDO (Mt)	gr.			
DENSIDAD SATURADA (ρ _m)	gr/cm ³			
LECTURA INICIAL (Li)	mm			
LECTURA FINAL (Lf)	mm			
EXPANSIÓN DE LA MUESTRA	%			
CAPSULA No.				
W _{CAP}	gr.			
W _{CAP} + SH	gr.			
W _{CAP} + SS	gr.			
CONTENIDO DE AGUA AL COMIENZO (W)	%			
CAPSULA No.				
W _{CAP}	gr.			
W _{CAP} + SH	gr.			
W _{CAP} + SS	gr.			
CONTENIDO DE AGUA AL FINAL (W)	%			
CONTENIDO DE AGUA PROMEDIO (W)	%			
DENSIDAD SECA (r _d)	gr./cm ³			

$$\rho_m = \frac{(M_t - M_{md})}{1000V}$$

ρ_m = Densidad húmeda del espécimen compactado (Mg/m³).
 M_t = Masa del espécimen compactado más el molde (kg).
 M_{md} = Masa del molde (kg).
 V = Volumen del molde de compactación (m³).

$$E = \frac{Li - Lf}{h} \times 100$$

Li = Lectura inicial del comparador dial (mm).
 Lf = Lectura final del comparador dial (mm).
 h = Altura del espécimen (mm).
 E = Expansión de la muestra (%).

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{w}{100}}$$

ρ_d = Densidad seca del espécimen compactado (Mg/m³).
 ρ_m = Densidad húmeda del espécimen compactado (Mg/m³).
 W = Contenido de agua (%).

OBSERVACIONES: _____



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - ACATLÁN

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

NOMBRE _____ FECHA _____ No. DE TRABAJO _____
 UBICACIÓN _____
 MUESTRA No. _____ CAPA No. _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____

SATURACIÓN							
FECHA Y HORA	TIEMPO (HRS.)	SOBRECARGA kg		SOBRECARGA kg		SOBRECARGA kg	
		LECT. DIAL	EXPANSIÓN	LECT. DIAL	EXPANSIÓN	LECT. DIAL	EXPANSIÓN

APLICACIÓN DE CARGAS						
PENETRACIÓN N (mm)	PROBETA No.1		PROBETA No.2		PROBETA No.3	
	SOBRECARGA: kg		SOBRECARGA: kg		SOBRECARGA: kg	
	LECT. DIAL	PRESIÓN	LECT. DIAL	PRESIÓN	LECT. DIAL	PRESIÓN
0						
0.64						
1.27						
1.91						
2.54						
3.18						
3.81						
4.45						
5.08						
7.62						
10.16						
12.7						

PROBETA No	PENETRACIÓN		PRESIÓN (MPa) (De gráfico 1)	CARGA PATRÓN (MPa)	% CBR (PRESIÓN/CARGA PATRÓN) (De gráfico 2)
	(in)	(mm)			
1	0.1"	2.54		6.9	
10 GOLPES	0.2"	5.08		10.3	
2	0.1"	2.54		6.9	
25 GOLPES	0.2"	5.08		10.3	
3	0.1"	2.54		6.9	
56 GOLPES	0.2"	5.08		10.3	

CBR (%) _____
 DENSIDAD SECA (gr./cm3) _____

OBSERVACIONES: _____

