

**RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO  
CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y  
COMPRESIÓN SIMPLE PARA ARENAS LIMOSAS**

**SERGIO ANDRÉS QUESADA OREJARENA  
LUIS CARLOS DURAN RUEDA**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2010**

**RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO  
CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y  
COMPRESIÓN SIMPLE PARA ARENAS LIMOSAS**

**SERGIO ANDRÉS QUESADA OREJARENA  
LUIS CARLOS DURAN RUEDA**

**Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director**

**INGENIERO GERARDO BAUTISTA GARCÍA**

**Magíster en Ingeniería Civil**

**Área de Geotecnia**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2010**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bucaramanga, Marzo de 2010

## **DEDICATORIA**

A Dios, quien me dio la suficiente fortaleza para seguir adelante con mis metas y aspiraciones, quien me ha dado tantas bendiciones en mi vida, como mi familia, mis amigos y aquellas personas especiales que siempre han estado a mi lado en los momentos más difíciles.

A mis padres, por el apoyo y el amor incondicional, quienes a diario me guiaron con sus consejos para seguir el camino correcto que me llevaría al alcance de mis sueños, de todo corazón les doy las gracias por darme la oportunidad de realizar este sueño.

A mis hermanos Edgar, Carlos y Oscar quienes con su valerosa compañía durante toda mi juventud y en especial durante mi carrera profesional, lograron que cada una de mis decisiones fueran las correctas y de no ser así, corregirlas de la mejor manera. A ellos mil gracias por apoyarme desinteresadamente en la realización de mi formación personal y profesional.

A mis amigos más cercanos Fabián, Edgar, Jorge, Argemiro, Alexis, Carlitos y Jose Jaime que siempre estuvieron a mi lado compartiendo alegrías y tristezas, que me acompañaron durante el proceso para realizar este tan anhelado sueño, a Ingrid por ser tan especial conmigo y darme tantos momentos de alegría en la recta final de mi carrera, a Mari por escucharme cuando más lo necesitaba, a todos ellos y a los que se me olvidó mencionar, muchas pero muchas gracias por su total colaboración y apoyo en los momentos difíciles, y así cumplir con mis metas propuestas desde el principio

**MUCHAS GRACIAS.**

**SERGIO ANDRÉS QUESADA OREJARENA**

## **DEDICATORIA**

Dios, gracias por haberme permitido cumplir este sueño después de tantos obstáculos que se presentaron durante mi carrera y que con tu ayuda me diste fuerzas e inteligencia para salir de cada uno de ellos, con tu presencia me iluminaste y me guiaste por el camino que me llevaron a ser un buen hijo, amigo y profesional...

Padre, con tus consejos, amor y apoyo sincero, su hijo le entrega un triunfo más para la familia Duran Rueda, esa familia que soñaste toda la vida y construiste para que cada uno de sus miembros fueran las mejores y que lograran ser todos unos profesionales honestos y exitosos...

Madre, se que con tus oraciones y con cada uno de tus consejos, pude sacar este objetivo que comenzó cuando me comprometí a estudiar esta carrera, hoy te sentirás muy orgullosa de tu hijo menor y que quiere compartir muchos más triunfos de aquí en adelante...

A mis hermanas, Beatris Elena, Nhora milena, por darme ese amor y esa fuerza durante toda mi vida, por haberme enseñado las cosas realmente importantes, por el ejemplo que me dan día tras día de cómo ser un buen trabajador y de cómo construir un lindo hogar...

A Sandra Marcela Fiallo, quien me acompañó durante toda mi carrera, quien con su amor sincero y desinteresado me ayudo en cada instante, por haberme entregado lo mejor de sí, por enseñarme a soñar y a ver la vida desde otra perspectiva...

A mi familia, amigos, compañeros, docentes y a todas las personas que compartieron conmigo, decirles que sin su ayuda no hubiera podido lograr este triunfo, por esta razón solo tengo palabras de gratitud...

**LUIS CARLOS DURAN RUEDA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la Universidad Pontificia Bolivariana, y en especial a la escuela de Ingeniería Civil.

Al Ingeniero Gerardo Bautista director de nuestra tesis, por su gran enseñanza y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Al Ingeniero Aldemar Remolina, Director de la facultad de Ingeniería civil, por su apoyo y guía durante los últimos semestres de nuestra carrera.

A todos los docentes de pregrado en especial a los ingenieros Ricardo Pico, Néstor Prado, Claudia Retamoso, Juan Carlos Forero y Luz Marina Torrado, que aportaron en nuestra formación personal y profesional.

A los señores Helí Rueda y Vicente Páez por brindarnos su asesoría y sus conocimientos acerca de los ensayos realizados en el laboratorio.

Y a las demás personas que participaron directa o indirectamente en la realización de este proyecto.

## CONTENIDO

	<b>Pagina</b>
INTRODUCCIÓN	
1. OBJETIVOS	15
1.1. Objetivo general	15
1.2. Objetivos específicos	15
2. ANTECEDENTES	16
2.1. Incidencia de la compactación en la resistencia al corte de arcillas arenosas	16
2.2. Incidencia de la compactación en la resistencia al corte de arcillas de baja compresibilidad	17
3. METODOLOGÍA	18
3.1. Revisión bibliográfica	18
3.2. Toma de muestras	18
3.3. Ensayos de laboratorio	18
3.4. Análisis de resultados	18
3.5. Redacción de informe	18
4. MARCO TEORICO	20
4.1. SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	20
4.1.1. Suelos gruesos	20
4.1.2. Suelos finos	23
4.2. COMPACTACIÓN DE SUELOS	26
4.2.1. Principios generales	26
4.2.2. Factores que afectan la compactación	27
4.2.3. Prueba Proctor Modificada	28
4.3. RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE	30
4.3.1. Prueba directa de resistencia al esfuerzo cortante	30
4.3.2. Prueba de compresión triaxial	33

4.3.3. Prueba de compresión no confinada	35
5. RESULTADOS OBTENIDOS	40
5.1. Granulometría	40
5.2. Límites de consistencia	41
5.3. Proctor modificado	41
5.4. ENSAYOS DE CORTE DIRECTO	42
5.4.1. Humedad de 8,5%	42
5.4.2. Humedad de 12,5%	43
5.4.3. Humedad de 16,5%	44
5.5. ENSAYOS DE COMPRESIÓN INCONFINADA	45
5.5.1. Humedad de 8,5%	45
5.5.2. Humedad de 12,5%	46
5.5.3. Humedad de 16,5%	47
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
6.1. Análisis de resultados de los ensayos de corte directo	49
6.2. Análisis de resultados de los ensayos de compresión inconfiada	52
6.3. Análisis de resultados entre los ensayos de corte directo y compresión inconfiada	53
7. CONCLUSIONES	56
8. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	58
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXOS	61

## LISTA DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 1.</b> Resultados de granulometría.	40
<b>Tabla 2.</b> Resultados de límites de consistencia.	41
<b>Tabla 3.</b> Resultados de la prueba Proctor Modificado.	41
<b>Tabla 4.</b> Ensayos de corte directo – Humedad 8,5%.	42
<b>Tabla 5.</b> Ensayos de corte directo – Humedad 12,5%.	43
<b>Tabla 6.</b> Ensayos de corte directo – Humedad 16,5%.	44
<b>Tabla 7.</b> Ensayos de compresión inconfiada – Humedad 8,5%.	45
<b>Tabla 8.</b> Ensayos de compresión inconfiada – Humedad 12,5%.	46
<b>Tabla 9.</b> Ensayos de compresión inconfiada – Humedad 16,5%.	47
<b>Tabla 10.</b> Resultados promedios de compresión inconfiada.	52
<b>Tabla 11.</b> Resultados entre los ensayos de Corte Directo y Compresión Inconfiada.	53
<b>Tabla 12.</b> Valores promedio de $q_u$ , $\phi$ y cohesión.	54

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Metodología.	19
<b>Figura 2.</b> Carta de plasticidad.	24
<b>Figura 3.</b> Pisón usado para la prueba Proctor modificado.	29
<b>Figura 4.</b> Aparato de resistencia al esfuerzo cortante directo.	31
<b>Figura 5.</b> Maquina de compresión triaxial.	35
<b>Figura 6.</b> Tubos de pared delgada.	36
<b>Figura 7.</b> Extracción de la muestra y prueba de compresión no confinada.	37
<b>Figura 8.</b> Grafica esfuerzo-deformación.	38
<b>Figura 9.</b> Penetrómetro de bolsillo.	39
<b>Figura 10.</b> Granulometría por mallas.	40
<b>Figura 11.</b> Relación entre $\gamma_d$ y $W$ .	49
<b>Figura 12.</b> Relación entre $\phi$ y $W$ .	50
<b>Figura 13.</b> Relación entre $C$ y $W$ .	51
<b>Figura 14.</b> Relación entre $q_u$ y $W$ .	52
<b>Figura 15.</b> Relación entre $\phi$ y $q_u$	54
<b>Figura 16.</b> Relación $C$ y $q_u$ .	55

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Página</b>
ANEXO A. Registro Fotográfico.	61
ANEXO B. Ensayos de Granulometría.	67
ANEXO C. Ensayos de Límites de Atterberg.	68
ANEXO D. Ensayos de Proctor Modificado.	69
ANEXO E. Ensayos de Corte Directo.	70
ANEXO F. Ensayos de Compresión Inconfinada.	71
ANEXO G. Normas de Invias I.N.V.E – 123 – 07 Ensayos de Granulometría.	72
ANEXO H. Normas de Invias I.N.V. E – 125 – 07 Normas de Invias I.N.V. E – 126 – 07 Ensayo de Límites de Atterberg.	82
ANEXO I. Normas de Invias I.N.V. E – 142 – 07 Ensayo de Proctor Modificado.	108
ANEXO J. Normas de Invias I.N.V. E – 154 – 07 Ensayo de Corte Directo	125
ANEXO K. Normas de Invias I.N.V. E – 152 – 07 Ensayo de Compresión Inconfinada	142

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN SIMPLE PARA ARENAS LIMOSAS

**AUTORES:** SERGIO ANDRÉS QUESADA OREJARENA  
LUIS CARLOS DURAN RUEDA

**FACULTAD:** INGENIERÍA CIVIL

**DIRECTOR:** GERARDO BAUTISTA GARCÍA

### **RESUMEN**

La Universidad Pontificia Bolivariana, fue el escenario principal para la realización de nuestro proyecto que inició con la selección del material a estudiar, el cual se halló en la corona del muro en tierra armada, ubicado en la parte superior del bloque D.

Una vez seleccionado el material de estudio, se procedió a realizar los respectivos ensayos de clasificación del suelo, que permitieron establecer que ciertamente se trataba una arena limosa. Añadido a esto se realizaron los ensayos de Proctor modificado para determinar la humedad óptima de compactación con la cual se trabajaría en el proyecto.

Se realizaron 90 ensayos de Corte Directo y 90 ensayos de Compresión simple, de los cuales 30 ensayos se llevaron a cabo con la humedad de 8,5%, otros 30 ensayos con la humedad óptima de 12,5% y por último 30 ensayos con la humedad de 16,5% para los 2 tipos de ensayos realizados.

Con los resultados obtenidos de los ensayos corte directo y compresión Simple, se hicieron análisis y los respectivos cálculos matemáticos, que permitieron encontrar las tendencias entre las diferentes propiedades físicas presentes en las arenas limosas ensayadas. Para dar fin a nuestra investigación, se hicieron las conclusiones y recomendaciones respectivas.

**PALABRAS CLAVES:** Proctor, óptima, compresión, compactación.

## **GENERAL SUMMARY OF WORK OF DEGREE**

**TITLE:** RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN SIMPLE PARA ARENAS LIMOSAS

**AUTHORS:** SERGIO ANDRÉS QUESADA OREJARENA  
LUIS CARLOS DURAN RUEDA

**FACULTY:** CIVIL ENGINEERING

**DIRECTOR:** GERARDO BAUTISTA GARCÍA

### **ABSTRACT**

The Universidad Pontificia Bolivariana, was the main stage for the realization of our project which began with the selection of material to study, which was found in the crown of the mechanically stabilized earth wall, located on the top of the block D.

After selecting the material of study was undertaken to determine the respective soil classification tests, which helped confirm that indeed it was silty sand. Added to this were carried out tests to determine the modified Proctor compaction optimum moisture with which to work on the project.

90 trials were conducted direct shear and simple compression tests 90, of which 30 trials were carried out with the humidity of 8.5%, other 30 trials with optimal moisture of 12.5% and last 30 trials moisture of 16.5% for the 2 types of tests performed.

With the results of direct shear and compression tests Simple, became the respective analysis and mathematical calculations, which resulted in getting the trends among the different physical properties present in the silty sands tested. To put an end to our investigation, the findings were made and recommendations.

**KEY WORDS:** Proctor, compaction, optimum.

## INTRODUCCIÓN

Los ensayos de corte directo, permite determinar el ángulo de fricción interna de un suelo y prácticamente se realizan sobre muestras inalteradas. Para conocer el ángulo de fricción interna del material se realizaron los respectivos ensayos de laboratorio para una arena limosa.

La dificultad de realizar estos ensayos en una arena limosa, radica en que la toma de las muestras se dificulta, ya que al introducir las formaletas en el terreno y luego sacarlas, el material no permanece dentro de dichas formaletas sino que se sale de estas debido a la cohesión baja o nula, que presenta este tipo de suelo.

Por medio del ensayo de Compresión Inconfinada se puede obtener un valor de la resistencia a la compresión, la cual en suelos cohesivos se correlaciona con la cohesión no drenada. Este ensayo se ejecuta sobre muestras inalteradas, remodeladas o compactadas en moldes con diferentes energías mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación. En este trabajo se encontró una relación entre el ángulo de fricción interna y la resistencia a la compresión inconfinada para arenas limosas para cierto rango de humedades.

Adicionalmente se encontraron otras relaciones entre diferentes propiedades físicas de las arenas limosas estudiadas.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Hallar la relación existente entre el ángulo de fricción interna y la compresión inconfiada de arenas limosas.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Encontrar el suelo adecuado para realizar la investigación.
- Obtener la relación densidad/humedad mediante ensayos de compactación para hallar la densidad seca máxima y la humedad óptima.
- Realizar ensayos de corte directo y compresión simple sobre muestras inalteradas, re moldeadas o compactadas con la humedad óptima y cuatro puntos porcentuales por encima y por debajo de la humedad óptima.
- Obtener relaciones entre la compresión inconfiada del suelo, ángulo de fricción interna, la cohesión, la densidad y humedad de compactación.

## 2. ANTECEDENTES

La Universidad Pontificia Bolivariana, junto con un grupo de estudiantes aspirantes al título de Ingenieros Civiles, realizó dos investigaciones para tesis de grado, la primera lleva por nombre **“Incidencia de la compactación en la resistencia al corte de arcillas arenosas”** de **Flórez y Villamizar (2007)**<sup>1</sup>; y la segunda **“incidencia de la compactación en la resistencia al corte de arcillas de baja compresibilidad”**, de **Cepeda y Trujillo (2007)**<sup>2</sup>, de las cuales se obtuvo una relación entre el ángulo de fricción interna y la humedad de compactación.

### 2.1. INCIDENCIA DE LA COMPACTACIÓN EN LA RESISTENCIA AL CORTE DE ARCILLAS ARENOSAS

La tesis presentada por Flórez y Villamizar (2007) tuvo como objetivo principal comparar la variación de los parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción), con respecto a las humedades y grados de compactación para arcillas arenosas de baja compresibilidad color amarillo.

Se realizaron los apiques necesarios para tomar las muestras requeridas y así de esta manera clasificar el tipo de suelos a estudiar, realizando los ensayos de granulometría y límites de plasticidad.

Luego de esto se realizaron ensayos de compactación tipo Proctor Modificado para determinar la humedad óptima y el peso específico máximo para el tipo de

---

<sup>1</sup> FLOREZ JAMSA, Sara, y VILLAMIZAR MENDEZ, Yelissa. Incidencia de la compactación en la resistencia al corte de arcillas arenosas: Universidad Pontificia Bolivariana. 2007.

<sup>2</sup> CEPEDA VARGAS, Ricardo, y TRUJILLO BOLIVAR, Juan D. Incidencia de la compactación en la resistencia al corte de arcillas de baja compresibilidad: Universidad Pontificia Bolivariana. 2007.

suelo estudiado. Para las humedades escogidas, se compactaron moldes y se tomaron muestras para el ensayo de corte directo con el fin de obtener  $c$  y  $\phi$ .

Antes de finalizar el proyecto se realizó un análisis estadístico para la cohesión, el ángulo de fricción, la densidad húmeda y la densidad seca para cada humedad de compactación. Para concluir se hizo el análisis de los resultados y a partir de este se establecieron tendencias, dando recomendaciones y conclusiones.

## **2.2. INCIDENCIA DE LA COMPACTACIÓN EN LA RESISTENCIA AL CORTE DE ARCILLAS DE BAJA COMPRESIBILIDAD**

Al igual que la tesis expuesta anteriormente se comparó la variación de los parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción) con respecto a las humedades y grados de compactación.

Por otro lado Cepeda y Trujillo (2007), realizaron los procedimientos adecuados para la extracción, clasificación y estudio de las muestras de suelos, que en este caso son arcillas de baja compresibilidad color violeta.

También se determinó la humedad óptima y el peso específico máximo para el tipo de suelo estudiado mediante ensayos de compactación tipo Proctor Modificado y para las humedades de compactación escogidas, se compactaron moldes y de ellos se tomaron muestras con el mismo fin, obtener  $c$  y  $\phi$ .

El análisis de los resultados se llevó a cabo a partir de este establecer tendencias, dando recomendaciones y conclusiones, después de haber hecho los respectivos análisis estadísticos para la cohesión, el ángulo de fricción, la densidad húmeda y la densidad seca de cada humedad.

### 3. METODOLOGÍA

Los siguientes puntos muestran los pasos a seguir para el cumplimiento de los objetivos trazados al inicio de este trabajo de grado:

**3.1. Revisión bibliográfica:** Se hizo el estudio pertinente para cada uno de los ensayos que se realizaron según lo indica la norma.

**3.2. Toma de muestras:** Se tomaron las cantidades de suelo necesarias para la realización de dichos ensayos.

**3.3. Ensayos de laboratorio:**

- Se llevaron a cabo 3 ensayos de granulometría, 3 ensayos de límites de Atterberg y 3 pruebas tipo Proctor modificado, con el fin de clasificar el suelo, conocer su humedad óptima y su densidad seca máxima.
- Se llevaron a cabo 90 ensayos de corte directo y 90 ensayos de compresión simple discriminados así:
  - 30 ensayos con la humedad óptima.
  - 30 ensayos con 4 puntos porcentuales por debajo de la humedad óptima.
  - 30 ensayos con 4 puntos porcentuales por encima de la humedad óptima.

**3.4. Análisis de resultados:** Se hizo una comparación entre el ángulo de fricción interna, la cohesión y la densidad con la resistencia a la compresión confinada para las respectivas humedades.

**3.5. Redacción del informe:** Se ejecutó la debida recolección y posterior análisis de los datos obtenidos en los ensayos.

Para una mejor comprensión de la metodología se presenta a continuación la siguiente figura.

# ANEXO 1

## FIGURA 1. METODOLOGÍA

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

El sistema unificado está basado en el sistema de aeropuertos, y se puede concluir que tiene unas pequeñas modificaciones con respecto a este.

El sistema unificado está centrado principalmente en los suelos gruesos y los finos, donde los diferencia a cada uno de ellos por el tamizado que se realiza a través de la malla 200; estos 2 tipos de suelos se pueden diferenciar ya que las partículas gruesas son mayores que esta malla y las finas menores. Un suelo grueso se considera de esta manera si más del 50% de sus partículas en peso son gruesas, y fino si más del 50% de sus partículas en peso son finas.<sup>3</sup>

#### 4.1.1. Suelos gruesos

Cada grupo de suelos que conforma el sistema unificado tiene una simbología que se forma por dos letras mayúsculas, cada una de estas letras son iniciales de los nombres de los suelos en inglés.

- En los suelos que predominan las gravas el símbolo está determinado por la letra G (gravel).
- En los suelos que predominan las arenas el símbolo está determinado por la letra S (sand).

Los materiales mencionados anteriormente se separan por medio de la malla N° 4, entonces un suelo pertenece al grupo de las gravas G, si más del 50% de su peso no pasa la malla N° 4, por otro lado un suelo pertenece al grupo de los finos S, si

---

<sup>3</sup> JUAREZ BADILLO - RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos .Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. Tomo I. 1997

mas del 50% de su peso pasa por la malla N° 4, que es el caso contrario al de las gravas.

Estos suelos mencionados anteriormente se subdividen en 4 tipos.

- Un suelo prácticamente limpio de finos y que sea bien graduado, se simboliza con la letra W (well graded). Al momento de combinar los grupos principales con este subgrupo, se obtienen los grupos GW y SW.
- Un suelo prácticamente limpio de finos, pero que sea mal graduado, se simboliza con la letra P (poorly graded). Al momento de combinar los grupos principales con este subgrupo, se obtienen los grupos GP y SP.
- Un suelo con una gran cantidad de finos no plásticos. Se simboliza con la letra M (del sueco mo y mjala). Al momento de combinar los grupos principales con este subgrupo, se obtienen los grupos GM y SM.
- Un suelo con una gran cantidad de finos plásticos, se simboliza con la letra C (clay). Al momento de combinar los grupos principales con este subgrupo, se obtienen los grupos GC y SC.<sup>4</sup>

### **Suelos GW y SW**

La particularidad de estos suelos, es que son bien graduados y con poca cantidad de finos. Esta cantidad de finos no debe afectar las características de resistencia y su capacidad de drenaje. Los requerimientos mencionados anteriormente se garantizan en la práctica, detallando que el contenido de finos en estos grupos no puede ser mayor al 5% en peso. La graduación se determina en el laboratorio, por medio de los coeficientes de uniformidad y curvatura. Para suponer una grava bien graduada, se exige que su coeficiente de uniformidad sea mayor que 4, por otro

---

<sup>4</sup> JUAREZ BADILLO - RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos .Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. Tomo I. 1997

lado el de curvatura debe estar comprendido entre 1 y 3. En el caso de las arenas bien graduadas, el coeficiente de uniformidad debe ser superior a 6 y el de curvatura igual que los límites anteriormente mencionados.

### **Suelos GP y SP**

En este grupo están los suelos mal graduados; quiere decir, que son de apariencia uniforme o predomina un tamaño específico, lo cual faltarían algunos intermedios. En el laboratorio deben cumplir con los requisitos mencionados para los grupos que se están tratando, en lo que se refiere al contenido de partículas finas, pero no cumplen con los requisitos de graduación indicados, lo cual los clasifica de esta manera. Dentro de estos grupos están comprendidas las gravas uniformes, como son las que se encuentran en los lechos de los ríos, las arenas uniformes de las playas y las mezclas de gravas y arenas finas, resultantes de estratos diferentes conseguidos durante procesos de excavación.

### **Suelos GM y SM**

En los suelos pertenecientes a estos grupos, el contenido de finos perturba las características de resistencia y la capacidad de drenaje libre; en campo se ha visto que esto sucede para porcentajes de finos superiores a 12% en peso, por lo cual esta cantidad es tomada como la frontera inferior para este contenido de partículas finas. La plasticidad de los finos perteneciente a estos grupos varía entre nula y media; es decir, los límites de plasticidad se localizan debajo de la línea A, o que su índice de plasticidad sea menos que 4 para la fracción que pase la malla N° 40.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> JUAREZ BADILLO - RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos .Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. Tomo I. 1997

## **Suelos GC y SC**

El contenido de finos en estos tipos de suelos debe ser mayor que 12% en peso, Sin embargo en este caso, los finos son de mayor plasticidad; por lo tanto es requisito que los límites de plasticidad estén sobre la línea A y que el límite plástico sea mayor que 7 para la fracción que pase la malla N° 40.

Los suelos gruesos que tienen finos entre el 5% y el 12% en peso, el Sistema Unificado los considera casos de frontera otorgándoles un símbolo doble.

### **4.1.2. Suelos finos**

El Sistema Unificado también clasifica estos suelos con un símbolo formado por dos letras mayúsculas, adoptadas con un juicio parecido al usado para los suelos gruesos, dividiéndolos de la siguiente manera:

- Limos orgánicos, simbolizado con la letra M (del sueco mo y mjala).
- Arcillas inorgánicas, simbolizado con la letra C (clay).
- Limos y arcillas orgánicas, simbolizado con la letra O (organic).

Las anteriores clasificaciones se subdividen, dependiendo su límite líquido en dos grupos. Si es menor de 50%, que determinar su baja o media compresibilidad baja o media se agrega la letra L (low compressibility), lográndose de esta manera los grupos ML, CL, y OL. Por otro lado, los suelos finos con límite líquido mayor de 50%, que determina su alta compresibilidad, se añade la letra H (high compressibility), lográndose así los grupos MH, CH, y OH.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> JUAREZ BADILLO - RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos .Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. Tomo I. 1997

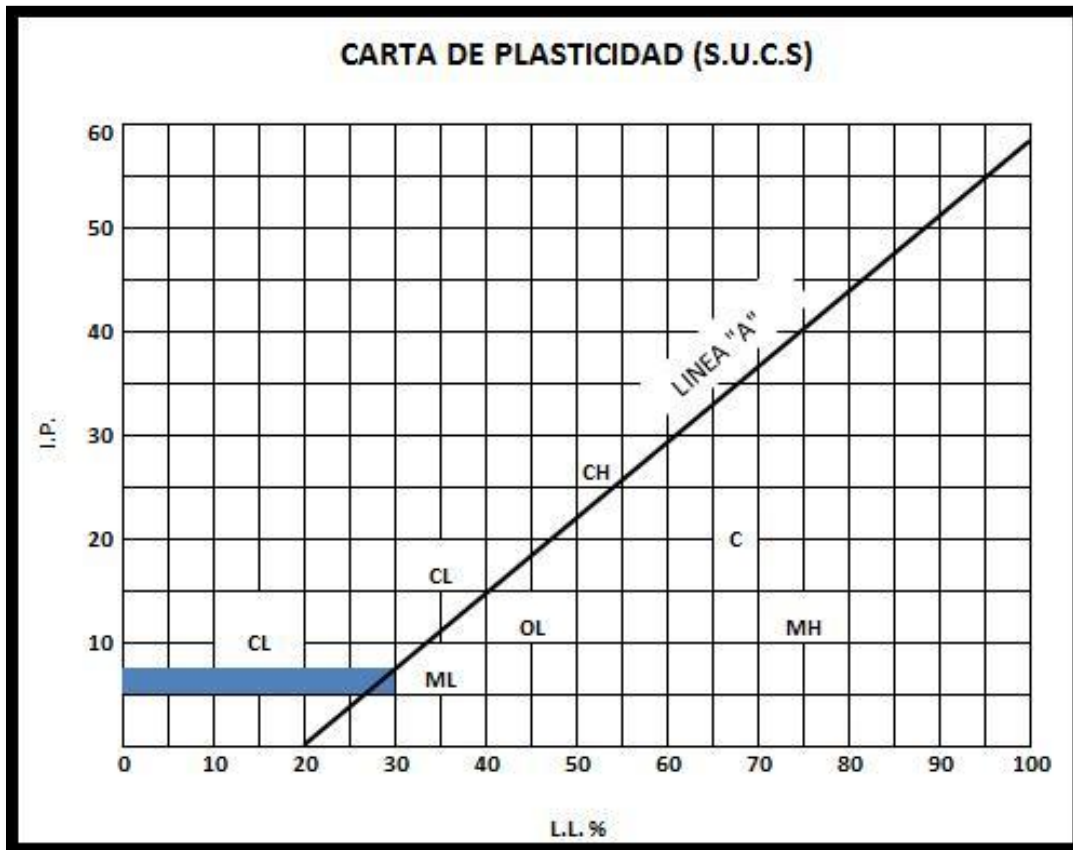


Figura 2. Carta de plasticidad.

Los diferentes grupos de suelos finos mencionados anteriormente se describen a continuación en forma más específica.

### Suelos CL y CH<sup>7</sup>

En estos grupos se encuentran las arcillas inorgánicas. El grupo CL corresponde a la zona sobre la Línea A, que está definida por el límite líquido menor a 50% y el índice de plasticidad mayor al 7%.

<sup>7</sup> JUAREZ BADILLO - RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos .Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. Tomo I. 1997

El grupo CH corresponde a la zona superior de la Línea A, que está definida por el límite líquido mayor a 50%.

### **Suelos ML y MH**

El grupo ML está ubicado en la zona bajo la Línea A, que se define por el límite líquido menor al 50% y la parte sobre la Línea A con índice de plasticidad menor a 4.

El grupo MH corresponde a la zona debajo de la Línea A, que está definida por el límite líquido mayor a 50%.

En estos grupos encontramos los limos inorgánicos y limos arcillosos.

También encontramos un tipo de suelo muy interesante, las arcillas de tipo caolín, derivadas de los feldespatos de rocas graníticas; a pesar que las arcillas están muy divulgadas para estos suelos, algunas de sus características corresponden a limos inorgánicos. En algunos casos estas arcillas caen en casos de frontera, dada su proximidad con esta línea.

### **Suelos OL y OH**

Las franjas que corresponden a estos dos grupos son las mismas para los grupos ML y MH, respectivamente. En una arcilla inorgánica el límite líquido crece, sin apreciable cambio de su índice de plasticidad, con una pequeña adición de materia orgánica coloidal; esto hace que el suelo se desplace hacia la derecha de la carta de plasticidad, pasando a ocupar una posición más alejada de la Línea A.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> JUAREZ BADILLO - RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos .Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. Tomo I. 1997

## 4.2. COMPACTACIÓN DE SUELOS

En la construcción de estructuras de ingeniería como presas de tierra o muros de contención, los suelos se usan para estos proyectos deben ser compactados para incrementar su peso específico. Otra de las cualidades de la compactación es incrementar las características de resistencia de los suelos, para aumentar la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. Por otro lado la compactación reduce la cantidad de asentamientos de las estructuras y aumenta la estabilidad de los taludes. En este capítulo se analizan las principales características de la compactación de suelos.

### 4.2.1. Principios generales<sup>9</sup>

La compactación es la aplicación de una carga sobre un suelo, para aumentar la resistencia del mismo, lo cual requiere una energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se expresa en términos de su peso específico seco. Al momento de agregar agua al suelo durante la compactación, esta se comporta como un causante que hace que las partículas del suelo se ablanden, que hace que se deslicen entre si y tomen una característica más densa. Después de la compactación el peso específico del suelo se incrementa mediante aumento del contenido de agua.

$$\gamma = \gamma_{d(w=0)} = \gamma_1 \text{ (1)}$$

Cuando el contenido de agua se aumenta y se usa el mismo esfuerzo al momento de compactar, el peso del suelo crece en forma progresiva.

---

<sup>9</sup> BRAJAM. DAS. Fundamentos De Ingeniería Geotécnica. Editorial Thomson Learning. 2001.

Por lo tanto, el peso específico seco con este contenido agua está proporcionado por:

$$\gamma_{d(w=w1)} = \gamma_{d(w=0)} + \Delta\gamma_d \text{ (2)}$$

Cualquier aumento en el contenido de agua conlleva a disminuir el peso específico seco, debido a que el agua ocupa los espacios en los cuales podrían haber partículas de suelo. El contenido de agua con el cual se alcanza el máximo peso específico seco se llama humedad óptima.

El ensayo de laboratorio usado generalmente para determinar el peso específico seco máximo de compactación y la humedad óptima es la prueba de Proctor de compactación.

#### **4.2.2. Factores que afectan la compactación**

Los factores más importantes que afectan la compactación son el tipo de suelo y el esfuerzo de compactación (energía por volumen unitario).

#### **Efectos del tipo de suelo<sup>10</sup>**

La distribución granulométrica, la forma de los granos, la densidad de sólidos y la cantidad y tipo de arcilla presentes en un suelo, son influyentes en el peso específico seco máximo y en la humedad óptima. Para arenas, el peso específico seco tiene una tendencia general a decrecer primero, a medida que el contenido de agua aumenta, y luego se incrementa a un valor máximo con aumentos de agua. La disminución inicial del peso específico seco con un incremento del contenido de agua se imputa al efecto de la tensión capilar. A menos contenido de

---

<sup>10</sup> BRAJAM. DAS. Fundamentos De Ingeniería Geotécnica. Editorial Thomson Learning. 2001.

agua, la tensión capilar en los poros priva la tendencia de las partículas de suelo a moverse alrededor y ser compactadas densamente.

### **Efecto del esfuerzo de compactación**

Si el esfuerzo de compactación del suelo es alterado, la curva de agua-peso específico también mostrara modificaciones.

La prueba con la cual se realiza la compactación de un suelo, y que permite hallar el peso específico seco máximo y la humedad optima es Proctor Estándar.

- A medida que se incrementa el esfuerzo de compactación, el peso específico seco máximo de compactación también aumenta.
- A medida que se incrementa el esfuerzo de compactación, la humedad óptima disminuye de alguna forma.

Las anteriores conclusiones son validas para todos los tipos de suelos. Sin embargo el grado de compactación no es directamente proporcional al esfuerzo de compactación.

#### **4.2.3. Prueba Proctor modificada<sup>11</sup>**

La prueba de Proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones en campo. A ésta se denomino prueba de Proctor modificada (prueba D-1557 de las ASTM y prueba T-180 de la AASHTO). Para desarrollar esta prueba de Proctor modificado se utiliza el mismo molde, con un volumen de 943.3 cm<sup>3</sup>. El suelo es compactado en cinco capas por un pisón que pesa 44.5 N. la caída del martillo es de 457.2 N. El número de golpes del martillo es de 65 golpes por capa.

---

<sup>11</sup> BRAJAM. DAS. Fundamentos De Ingeniería Geotécnica. Editorial Thomson Learning. 2001.

Al aumentar el esfuerzo de compactación, la prueba de Proctor modificado resulta en un aumento del peso específico seco del suelo. El incremento del peso específico seco máximo es acompañado por un decremento del contenido de agua óptimo.

Las especificaciones dadas para las pruebas de Proctor respecto al volumen del molde y el número de golpes por capa, son adoptadas para los suelos de grano fino que pasan la malla N° 4. Sin embargo, para cada prueba, tres métodos reflejan el tamaño del molde, el número de golpes por capa y el tamaño máximo de las partículas en un suelo determinado.



**Figura 3. Pisón usado para la prueba Proctor modificado.**

### **4.3. RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE<sup>12</sup>**

El problema que genera la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, se dice que constituye uno de los factores fundamentales de la mecánica de suelos.

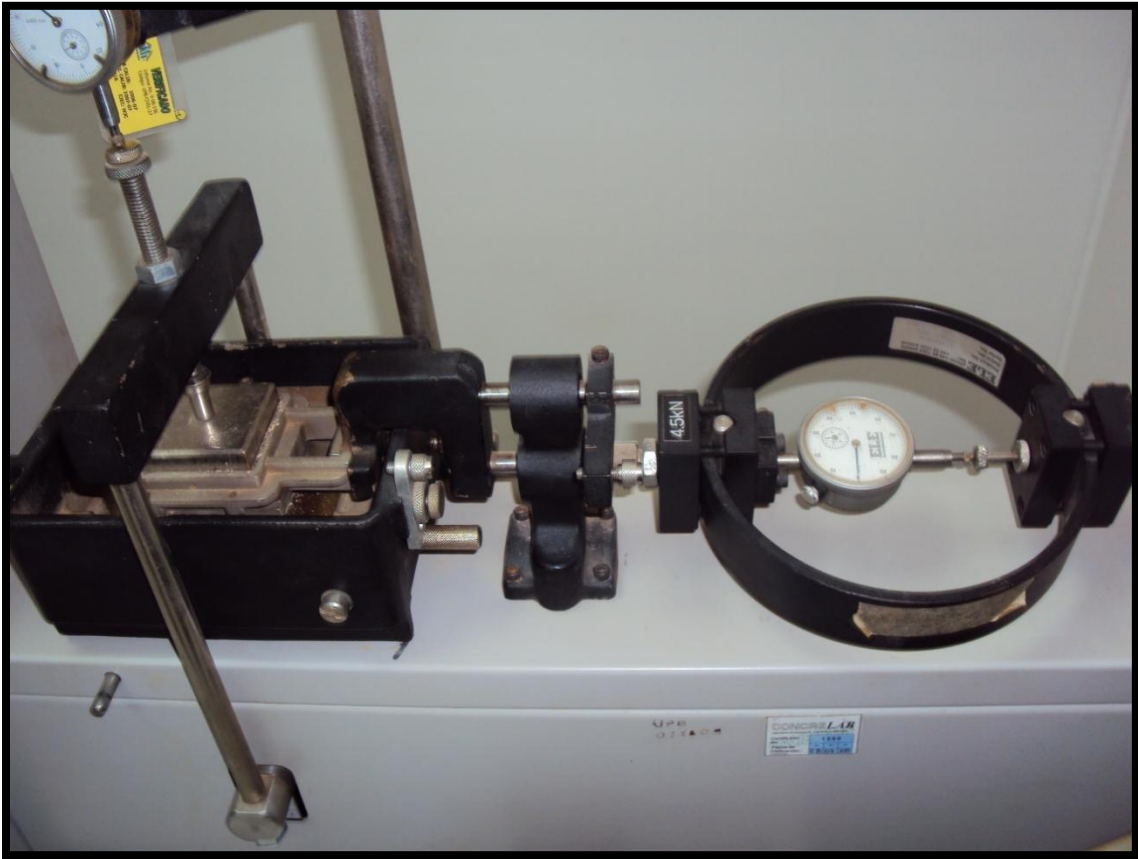
La mecánica de suelos había creído resolver el problema en forma satisfactoria; durante años basándose en ideas más precisas que otras anteriores, el ingeniero valuó la resistencia al esfuerzo cortante y construyó obras de tierra con mucha tranquilidad. Una vez que, se revisaron las ideas sobre la resistencia de los suelos, se vio que aquellas podían ser muy difícil sostenidas y por tal razón se hizo indispensable abandonarlas. Sin embargo, la tecnología o investigación actual no ha sido capaz de sustituir el cuerpo sistematizado y completo del que antes se disponía, por otro análogo y acorde con las nuevas ideas, en lo que se refiere al problema de resistencia al esfuerzo cortante.

#### **4.3.1. Prueba directa de resistencia al esfuerzo cortante**

La prueba directa de resistencia al esfuerzo cortante fue usualmente la única empleada para la determinación de la resistencia de los suelos durante muchos años. Hoy en día aun se conserva el interés de esta prueba debido a su simplicidad, sin embargo, ha sido en buena parte por las pruebas de compresión triaxial.

---

<sup>12</sup> BRAJAM. DAS. Fundamentos De Ingeniería Geotécnica. Editorial Thomson Learning. 2001.



**Figura 4. Aparato de resistencia al esfuerzo cortante directo.**

La máquina tiene dos marcos, uno fijo y otro móvil, que sujetan a la muestra del suelo. Dos piedras porosas ubicadas una en la parte superior y otra en la parte inferior, proporcionan drenaje libre a muestras saturadas, por otro lado se sustituyen simplemente por placas de confinamiento, al probar muestras secas.

La parte móvil de la máquina tiene un accesorio al cual es posible de aplicar una fuerza rasante, que provoca la falla de la muestra a lo largo de un plano horizontal. Sobre la cara superior del conjunto se aplican cargas que proporcionan una presión normal en el plano de falla, que se puede graduar como lo desee el laboratorista. La deformación de la muestra es medida con extensómetros, tanto en dirección horizontal como en vertical.

Los resultados de la prueba, en la cual se calculan los valores, corresponden a deformaciones sobre el plano de falla.

En todas las pruebas de resistencia de los suelos, existen dos posibilidades de desarrollo: el método de esfuerzo controlado y el de deformación controlada. En el primer método la prueba se lleva a cabo aplicando valores fijos de la fuerza tangencial al aparato, de tal manera que el esfuerzo aplicado tiene en todo momento un valor prefijado; en el segundo método, la maquina actúa con una velocidad de deformación constante y la fuerza que se aplica sobre la muestra se lee en la bascula de la maquina que la aplica.

Después de realizar varias pruebas con diversos valores de la presión normal, pueden tratarse puntos en la grafica con los valores de las presiones normales y los valores máximos de  $\tau$  obtenidos en cada una de las pruebas. Para obtener la línea de falla del material se unen los puntos obtenidos en el procedimiento.

Esta prueba tiene una desventaja que consiste en la imposibilidad de conocer los esfuerzos que actúan en planos distintos al de falla durante su realización. En el instante de falla, los esfuerzos que actúan en estas otras direcciones teniendo en cuenta que el circulo de falla debe ser tangente a la línea de falla.<sup>13</sup>

Uno de los inconvenientes más importantes de la prueba de resistencia al esfuerzo cortante es que su uso debe restringirse a los suelos de falla plástica, pues la curva esfuerzo-deformación obtenida, resulta desplazada hacia valores menores del esfuerzo, respecto a la que se hallaría con pruebas más adecuadas, proporcionando valores menores a la resistencia.

El extensómetro horizontal mide la deformación media de la superficie de falla como un promedio de los esfuerzos actuantes que no representa la máxima

---

<sup>13</sup> BRAJAM. DAS. Fundamentos De Ingeniería Geotécnica. Editorial Thomson Learning. 2001.

resistencia, si no que es menor. Esto no ocurre en los suelos de falla plástica, porque una vez alcanzada la falla, en todos los puntos de la sección crítica los esfuerzos son iguales, independientemente de cualquier concentración de la deformación tangencial; en este caso el esfuerzo promedio representa al máximo de falla.

En la práctica, sobre todo en análisis que se refieren en cuestiones de estabilidad, es conveniente distinguir entre la falla en puntos aislados y la falla del conjunto de la masa de suelo. En estructuras, cuando se utiliza un criterio elástico de diseño, es necesario calcular los distintos elementos de modo que en ningún punto de ellos sobrepase el esfuerzo de falla. Por el contrario en mecánica de suelos se sigue otro criterio, el cual es que ciertas zonas de la masa hayan sobre pasado su resistencia elástica y estén en estado plástico confinado, mediante razonables condiciones de seguridad.

La prueba que se está tratando, únicamente puede usarse en suelos de falla plástica, como son las arcillas blandas y as arenas sueltas. En arcillas rígidas y arenas compactas, la prueba conduce a resultados conservadores.

Otro inconveniente que existe para la prueba es que el área de la sección crítica esta variando durante la aplicación de la fuerza tangencial, lo cual conllevaría a efectuar correcciones que normalmente no suelen hacerse.<sup>14</sup>

#### **4.3.2. Prueba de compresión triaxial**

La prueba de compresión triaxial, se realiza envolviendo en una membrana impermeable una muestra cilíndrica de suelo, cuyas bases quedan en contacto con cabezas solidas equipadas de piedras porosas que sirven de filtro; los filtros están conectados a tubos delgados dotados de válvulas que permiten controlar la salida o entrada de agua a la muestra. Estos tubos de drenaje están conectados a

---

<sup>14</sup> BRAJAM. DAS. Fundamentos De Ingeniería Geotécnica. Editorial Thomson Learning. 2001.

una bureta graduada mediante el cual se puede determinar el volumen de agua expulsado o absorbido por el suelo. La unión entre las membranas y las cabezas se ata con una banda de hule que permite garantizar un sello hermético. Todo el conjunto queda encerrado en una cámara que se conecta a un tanque de agua a presión. La tapa superior de la cámara es atravesada por un vástago delgado que pasa por un depósito de grasa a presión y que evita las fugas de agua a lo largo de la pared del vástago y reduce al mínimo la fricción de esta contra la tapa.<sup>15</sup>

Existen varias maneras de ejecutar la prueba de compresión triaxial:

- Prueba rápida y sin drenaje. En este caso se aplica una presión de agua a la cámara que se trasmite hidrostáticamente a la muestra, actuando sobre la membrana y las cabezas.
- Prueba rápida consolidada. En este tipo de pruebas se aplica la presión al agua de la cámara y se abren las válvulas de drenaje de la muestra permitiendo que la presión de los fluidos de los poros, producida por incremento de presión aplicada, se disipe completamente.

---

<sup>15</sup> CRESPO V. CARLOS. Mecánica De Suelos Y Cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa S.A. 1990.

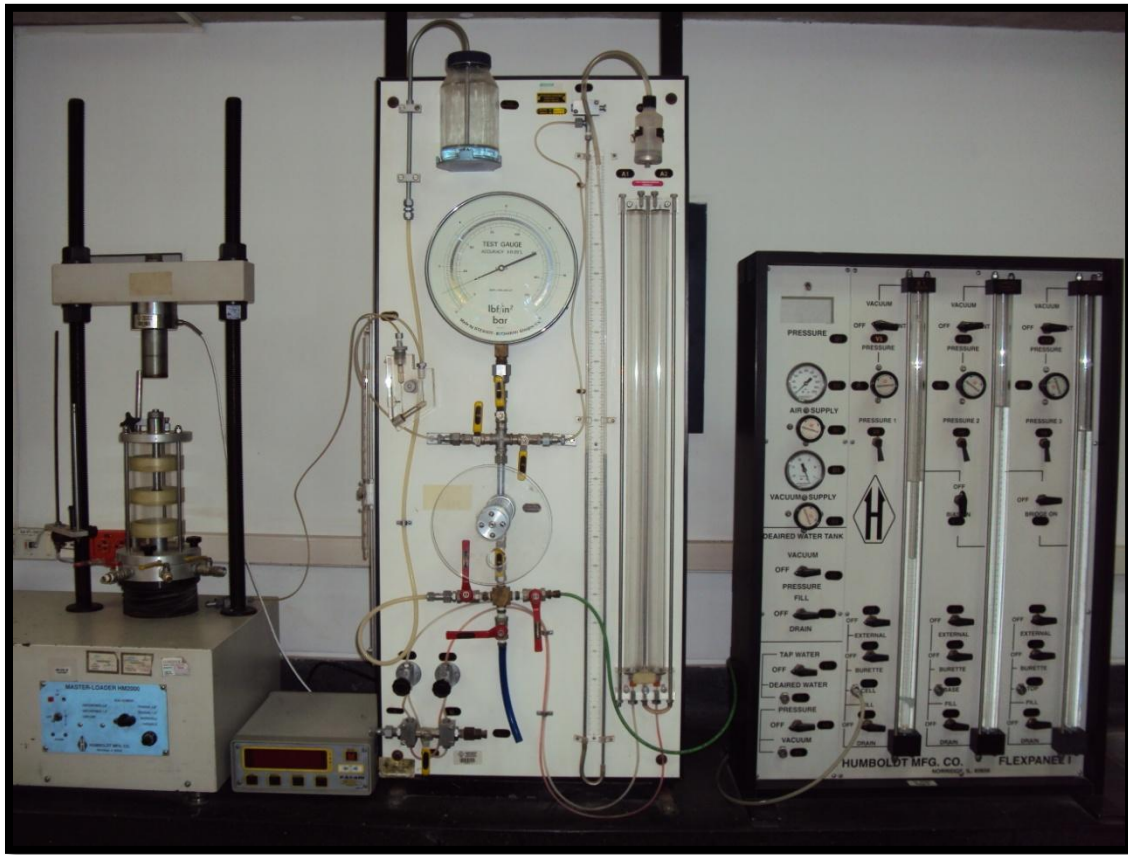


Figura 5. Maquina de compresión triaxial.

- Prueba lenta. Se permite la consolidación completa del suelo bajo la presión de la cámara, pero las válvulas de drenaje no se cierran al aplicar la carga axial sobre el vástago.
- Prueba gigante. Se emplean muestras de 15 cm. de diámetro y una relación de esbeltez de 2,5 a 3. Tiene por objeto ensayar agregados gruesos como gravas, arenas o mezclas de ellos; el procedimiento de la prueba es igual a los ya explicados.

#### 4.3.3. Prueba de compresión no confinada

La prueba de compresión inconfiada o prueba de compresión simple como también es llamada, ayuda en la determinación de la resistencia al corte de los

suelos, mientras no se indique que el método elástico para resolver problemas de estabilidad de estratos naturales de arcilla sea más práctico y exacto que el método plástico. Las muestras para el ensayo se obtienen por medio de tubos de pared delgada. (Ver figura 6).<sup>16</sup>



**Figura 6. Tubos de pared delgada.**

Las muestras son extraídas del tubo muestreador y se preparan para realizar la prueba de compresión simple de la siguiente manera. (Ver figura 12).

---

<sup>16</sup> CRESPO V. CARLOS. Mecánica De Suelos Y Cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa S.A. 1990.



Figura 7. Extracción de la muestra y prueba de compresión no confinada.

- Los extremos de la muestra son recortados cuidadosamente con un cuchillo, dejándola con una altura mínima de 2 veces el diámetro del cilindro.
- La muestra se coloca en la máquina de compresión y se centra en la base inferior. Un tablero análogo permite la lectura de la carga que se le aplica al cilindro que se está ensayando.
- Se aplica carga a una velocidad tal que haga comprimir la muestra a razón de 1 mm por minuto. La carga queda indicada de manera automática en el tablero de la máquina de compresión.
- El punto de falla se detecta fácilmente cuando la lectura de la carga disminuye mientras se está aplicando la fuerza.
- Luego se obtiene la carga leída en el tablero, haciendo uso de la curva de calibración de la máquina.

Con los datos obtenidos en el ensayo se construye una grafica de esfuerzos-deformaciones unitarias, con esto se obtiene el valor máximo de el esfuerzo  $q_u$  para la muestra que se está fallando.<sup>17</sup>

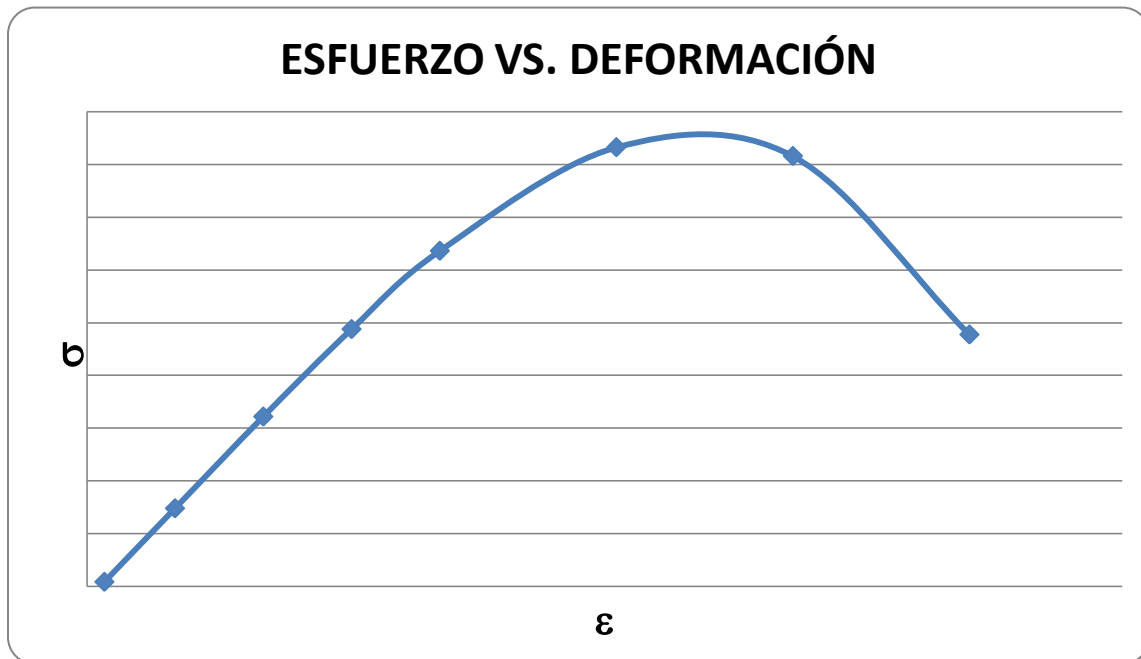


Figura 8. Grafica esfuerzo-deformación.

La resistencia  $q_u$  en la prueba de compresión inconfiada, se puede obtener en forma aproximada por medio del penetrómetro de bolsillo, que funciona de la siguiente manera:

- Se baja hasta el fondo del penetrómetro, que es la escala mínima de esta herramienta del laboratorio.
- Se toma la muestra y el penetrómetro y se empuja el pistón con una presión considerable dentro del suelo hasta la marca indica la resistencia del suelo en Kg.

<sup>17</sup> CRESPO V. CARLOS. Mecánica De Suelos Y Cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa S.A. 1990.



**Figura 9. Penetrómetro de bolsillo.**

- Se lee el esfuerzo de compresión inconfiada en unidades de  $\text{kg}/\text{cm}^2$  en la parte inferior del penetrómetro.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> CRESPO V. CARLOS. Mecánica De Suelos Y Cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa S.A. 1990.

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

### 5.1. GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS

Después de haber realizado los 3 ensayos de granulometría al suelo seleccionado los resultados obtenidos fueron los siguientes:

ARENA LIMOSA				
Evaluado	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Arenas (%)	59,04	58,11	58,10	58,42
Gravas (%)	0,57	0,06	1,23	0,62
Finos (%)	40,39	41,83	40,67	40,99

Tabla 1. Resultados de granulometría.

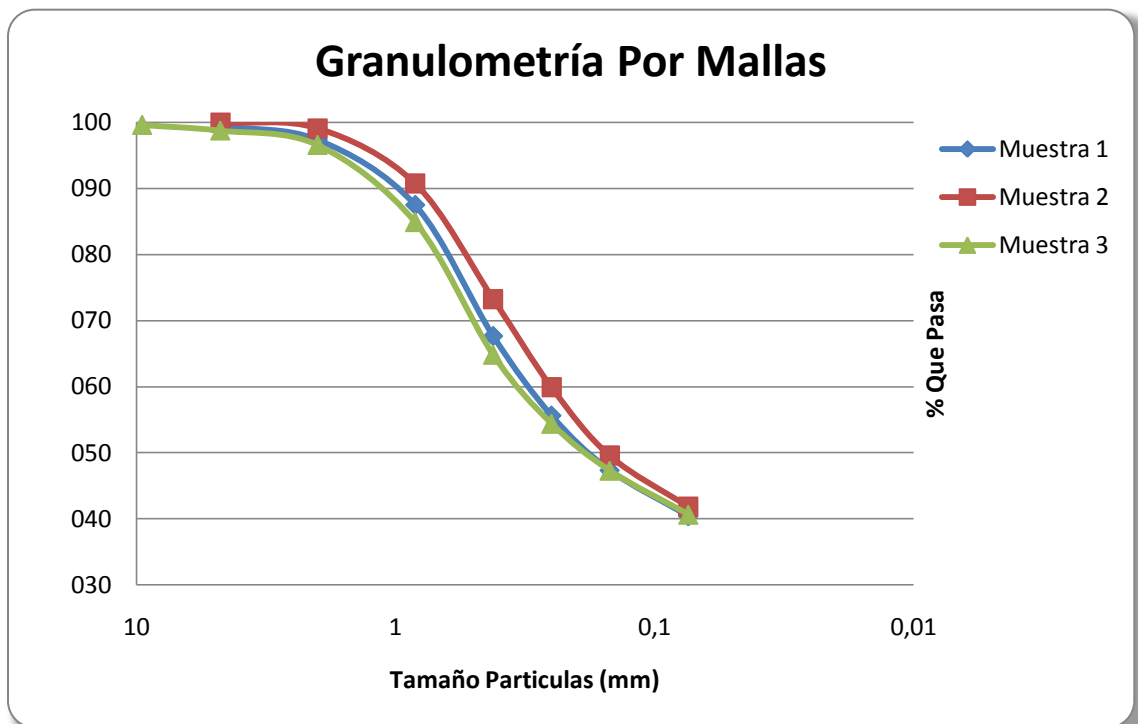


Figura 10. Granulometría por mallas.

## 5.2. LÍMITES DE CONSISTENCIA

Luego de haber realizado los 3 ensayos de plasticidad al suelo seleccionado, los resultados fueron los siguientes:

ARENA LIMOSA				
Evaluado	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
LI	27,39	44,08	38,67	36,71
Lp	19,03	33,29	31,11	27,81
Ip	8,36	11,54	7,56	9,15

Tabla 2. Resultados de límites de consistencia.

Con los resultados de los ensayos de granulometría por tamizado con lavado por la malla N° 200 y los resultados de los ensayos de límites de Atterberg, se clasificó al suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, obteniendo que el material estudiado pertenece al grupo SM (arenas limosas).

## 5.3. PROCTOR MODIFICADO

Luego de realizar los ensayos de compactación se encontró que la humedad optima promedio es de 12,5% y la densidad seca máxima promedio es de 1,92 g/cm<sup>3</sup>. Un resumen de los resultados se encuentra en la tabla 3.

MUESTRA	W (%)	$\gamma_d$ (T/m <sup>3</sup> )
1	12,52	1,923
2	12,54	1,924
3	12,5	1,92
<b>PROMEDIO</b>	12,5	1,92

Tabla 3. Resultados de la prueba Proctor Modificado.

## 5.4. ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

### 5.4.1. Humedad de 8,5%

Se realizaron 30 ensayos de corte directo, con arena limosa compactada con una humedad de 8,5%, obteniendo los siguientes resultados:

ENSAYO No	HUMEDAD (%)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	C (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	8,47	1,93	1,78	38,30	0,003
2	8,30	2,00	1,86	41,70	0,304
3	8,40	2,05	1,90	39,80	0,093
4	8,54	2,11	1,95	35,50	0,062
5	8,50	2,09	1,93	42,30	0,286
6	8,47	2,01	1,90	42,20	0,049
7	8,56	2,03	1,87	32,20	0,122
8	8,63	2,16	1,99	47,60	0,034
9	8,30	2,14	1,98	40,30	0,546
10	8,60	2,10	1,90	44,30	0,044
11	8,54	2,14	1,97	58,90	0,196
12	8,60	2,08	1,92	47,40	0,099
13	8,54	2,10	1,92	37,60	0,003
14	8,56	2,20	2,02	43,30	0,128
15	8,54	2,12	1,96	40,40	0,628
16	8,73	2,12	1,95	38,30	0,366
17	8,54	2,13	1,96	38,30	0,126
18	8,50	1,91	1,76	43,30	0,027
19	8,64	2,03	1,87	36,70	0,101
20	8,74	2,08	1,93	52,00	0,109
21	8,48	2,06	1,90	51,20	0,024
22	8,58	2,04	1,88	49,70	0,105
23	8,54	2,25	2,07	47,00	0,002
24	8,83	2,10	1,93	43,70	0,348
25	8,86	1,95	1,80	45,10	0,016
26	8,73	1,98	1,83	32,70	0,131
27	8,79	1,90	1,74	40,30	0,067
28	8,88	2,03	1,90	48,90	0,032
29	8,67	1,99	1,84	34,30	0,202
30	8,61	2,11	1,94	43,80	0,348
<b>Promedio</b>	8,59	2,06	1,91	42,57	0,15
<b>Desviación</b>	0,14	0,08	0,07	6,06	0,16
<b>Error (%)</b>	1,68	4,01	3,91	14,22	104,77

Tabla 4. Ensayos de corte directo – Humedad 8,5%.

#### 5.4.2. Humedad de 12,5%

Se realizaron 30 ensayos de corte directo, con arena limosa compactada con la humedad óptima de 12,5%, obteniendo los siguientes resultados:

ENSAYO No	HUMEDAD (%)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	C (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	12,41	2,19	1,95	37,90	0,618
2	12,53	2,15	1,91	44,80	1,543
3	12,65	2,10	1,95	41,30	0,726
4	12,57	2,22	1,96	36,10	0,874
5	12,42	2,31	2,06	39,80	0,956
6	12,52	2,25	2,00	48,00	1,372
7	12,46	1,70	1,51	45,60	0,607
8	12,66	2,43	2,16	49,20	1,606
9	12,50	2,50	2,19	28,90	0,966
10	12,45	2,30	2,02	52,40	0,122
11	12,48	2,27	2,02	39,40	0,939
12	12,57	2,35	2,10	42,70	0,706
13	12,60	2,20	2,03	41,30	0,328
14	12,64	2,21	1,96	43,40	0,757
15	12,64	2,31	2,05	43,60	1,074
16	12,50	2,34	2,10	39,80	1,134
17	12,51	2,41	2,14	46,00	1,105
18	12,53	2,23	1,98	40,90	0,840
19	12,33	2,30	2,02	45,60	1,046
20	12,52	2,30	2,00	52,60	0,002
21	12,60	2,40	2,10	35,90	1,362
22	12,55	2,34	2,10	38,80	1,204
23	12,55	2,34	2,10	37,50	1,228
24	12,46	2,35	2,10	39,90	1,059
25	12,50	2,33	2,10	39,80	0,940
26	12,45	2,34	2,10	36,60	1,004
27	12,60	2,30	2,04	42,90	0,332
28	12,64	2,30	2,00	46,70	0,268
29	12,41	2,19	1,95	45,50	1,584
30	12,40	2,20	1,95	42,20	0,601
<b>Promedio</b>	<b>12,52</b>	<b>2,27</b>	<b>2,02</b>	<b>42,17</b>	<b>0,897</b>
<b>Desviación</b>	<b>0,09</b>	<b>0,14</b>	<b>0,12</b>	<b>5,07</b>	<b>0,416</b>
<b>Error (%)</b>	<b>0,68</b>	<b>6,10</b>	<b>5,94</b>	<b>12,02</b>	<b>46,391</b>

Tabla 5. Ensayos de corte directo – Humedad 12,5%.

### 5.4.3. Humedad de 16,5%

Se realizaron 30 ensayos de corte directo, con arena limosa compactada con la humedad 16,5%, obteniendo los siguientes resultados:

ENSAYO No	HUMEDAD (%)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	C (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	16,71	2,25	1,93	49,00	0,313
2	16,54	2,25	1,93	45,70	0,218
3	16,64	2,29	1,97	41,80	0,446
4	16,62	2,29	1,96	45,40	0,372
5	16,56	2,31	1,98	32,80	1,008
6	16,55	2,26	1,94	41,30	0,721
7	16,57	2,17	1,86	36,20	0,355
8	16,55	2,18	1,89	30,50	0,479
9	16,56	2,28	1,95	41,20	0,599
10	16,57	2,30	1,97	39,60	0,466
11	16,64	2,30	1,97	45,20	0,396
12	16,53	2,29	1,97	34,00	0,743
13	16,51	2,32	1,99	37,60	0,590
14	16,55	2,36	2,03	41,70	0,623
15	16,44	2,33	2,00	34,00	0,628
16	16,54	2,31	1,98	32,40	0,707
17	16,60	2,35	2,02	28,00	0,752
18	16,55	2,35	2,01	37,80	0,659
19	16,60	2,47	2,12	30,60	0,869
20	16,41	2,44	2,10	39,40	0,491
21	16,52	2,31	1,98	38,00	0,556
22	16,51	2,27	1,95	36,30	0,595
23	16,55	2,34	2,01	34,00	0,687
24	16,60	2,33	1,99	45,10	0,208
25	16,54	2,36	2,03	27,40	0,818
26	16,48	2,42	2,07	35,30	0,735
27	16,51	2,37	2,04	29,80	0,649
28	16,60	2,32	1,96	35,10	0,636
29	16,56	2,45	2,10	34,50	0,601
30	16,55	2,27	1,95	39,60	0,242
<b>Promedio</b>	<b>16,56</b>	<b>2,32</b>	<b>1,99</b>	<b>37,31</b>	<b>0,572</b>
<b>Desviación</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,06</b>	<b>5,60</b>	<b>0,195</b>
<b>Error (%)</b>	<b>0,35</b>	<b>2,97</b>	<b>2,95</b>	<b>15,02</b>	<b>34,058</b>

Tabla 6. Ensayos de corte directo – Humedad 16,5%.

## 5.5. ENSAYOS DE COMPRESIÓN INCONFINADA

### 5.5.1. Humedad de 8,5%

Se realizaron 30 ensayos de compresión inconfiada, con una arena limosa compactada con la humedad de 8,5%, obteniendo los siguientes resultados:

Ensayo No	HUMEDAD INICIAL (%)	q <sub>u</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	8,30	5,654
2	8,12	4,530
3	8,19	6,363
4	8,21	5,950
5	8,12	5,225
6	8,02	5,929
7	8,30	9,731
8	8,48	9,759
9	8,27	10,237
10	8,35	6,837
11	8,23	8,050
12	8,19	8,630
13	8,27	10,893
14	8,32	6,757
15	8,10	11,789
16	8,21	8,443
17	8,54	11,266
18	8,14	8,019
19	8,23	11,665
20	8,65	5,616
21	8,12	11,027
22	8,59	7,545
23	8,39	5,516
24	8,83	11,420
25	8,56	8,980
26	8,11	12,474
27	8,23	13,369
28	8,33	12,380
29	8,59	7,453
30	8,34	8,582
<b>Promedio</b>	8,31	8,67
<b>Desviación Estándar</b>	0,19	2,54
<b>Error %</b>	2,31	29,28

Tabla 7. Ensayos de compresión inconfiada – Humedad 8,5%.

### 5.5.2. Humedad de 12,5%

Se realizaron 30 ensayos de compresión inconfiada, con una arena limosa compactada con la humedad óptima de 12,5%, obteniendo los siguientes resultados:

Ensayo No	HUMEDAD (%)	q <sub>u</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	12,50	16,639
2	12,23	16,814
3	12,35	14,506
4	12,05	13,648
5	12,92	13,617
6	12,32	13,073
7	12,07	13,623
8	12,72	14,710
9	12,76	13,467
10	12,22	16,483
11	12,79	13,884
12	12,61	13,396
13	12,08	16,126
14	12,36	16,580
15	12,53	14,487
16	12,19	14,603
17	12,05	15,997
18	12,15	16,416
19	12,11	16,180
20	12,18	16,097
21	12,26	16,378
22	12,63	13,827
23	12,85	6,665
24	12,20	13,218
25	12,39	14,874
26	12,38	12,938
27	12,28	13,382
28	12,03	13,264
29	12,44	13,690
30	12,22	13,894
<b>Promedio</b>	<b>12,36</b>	<b>14,42</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>0,26</b>	<b>1,97</b>
<b>Error %</b>	<b>2,10</b>	<b>13,65</b>

Tabla 8. Ensayos de compresión inconfiada – Humedad 12,5%.

### 5.5.3. Humedad de 16,5%

Se realizaron 30 ensayos de compresión inconfiada, con una arena limosa compactada con la humedad de 16,5%, obteniendo los siguientes resultados:

Ensayo No	HUMEDAD (%)	q <sub>u</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	16,01	9,490
2	16,35	9,379
3	16,13	8,744
4	16,03	11,774
5	16,02	10,222
6	16,24	9,982
7	16,05	10,668
8	16,57	10,855
9	16,30	8,899
10	16,40	10,881
11	16,37	8,355
12	16,10	9,423
13	16,53	9,991
14	16,14	9,377
15	16,24	7,614
16	16,31	11,389
17	16,48	9,416
18	16,30	9,475
19	16,05	8,885
20	16,35	10,893
21	16,13	10,324
22	16,22	9,946
23	16,71	10,682
24	16,16	10,857
25	16,46	8,984
26	16,42	10,906
27	16,33	8,353
28	16,82	9,201
29	16,27	9,889
30	16,83	9,427
<b>Promedio</b>	<b>16,31</b>	<b>9,81</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>0,22</b>	<b>0,98</b>
<b>Error %</b>	<b>1,37</b>	<b>10,03</b>

Tabla 9. Ensayos de compresión inconfiada – Humedad 16,5%.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de realizar todos los ensayos de corte directo y compresión inconfiada sobre las muestras de arena limosa seleccionadas, se analizaron los resultados con el fin de encontrar las tendencias existentes entre las diferentes propiedades físicas.

Se determinó la relación entre el ángulo de fricción interna y la resistencia a la compresión inconfiada, por medio de los cálculos realizados con los datos obtenidos en el laboratorio, para cada una de las pruebas correspondientes.

Las relaciones estudiadas fueron las siguientes:

- $\gamma_d$  vs.  $w$
- $\phi$  vs.  $w$
- $C$  vs.  $w$
- $q_u$  vs.  $w$
- $\phi$  vs.  $q_u$
- $C$  vs.  $q_u$

A continuación se presenta el análisis de los resultados más relevantes de la investigación.

## 6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO.

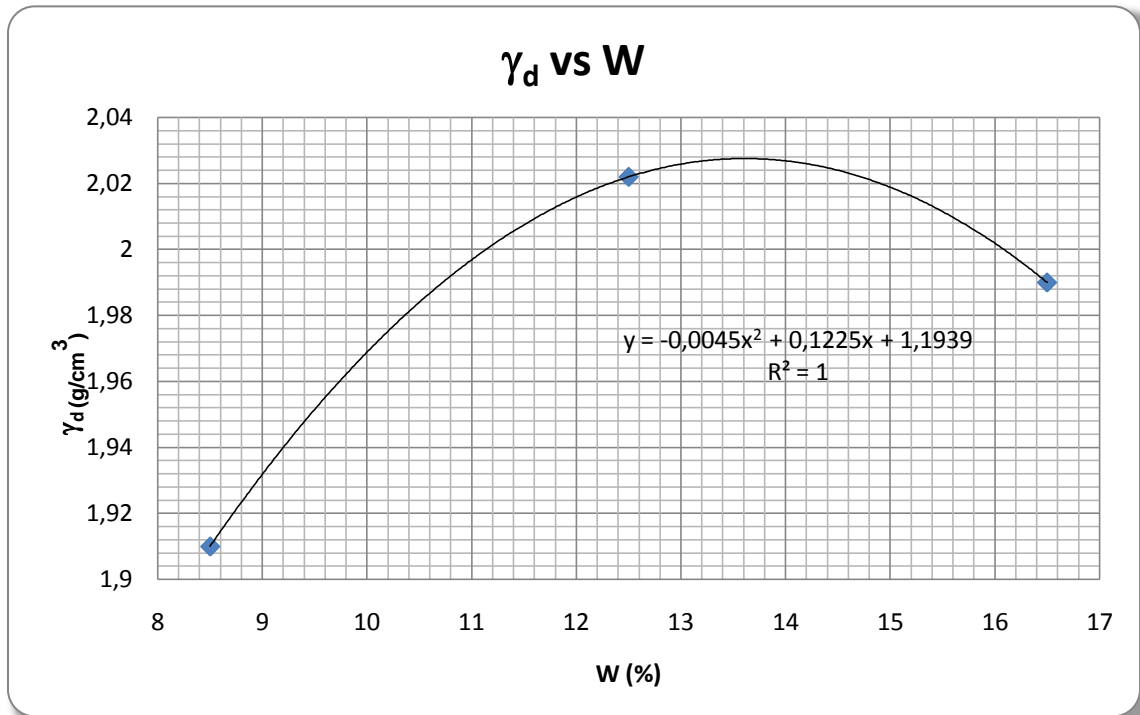
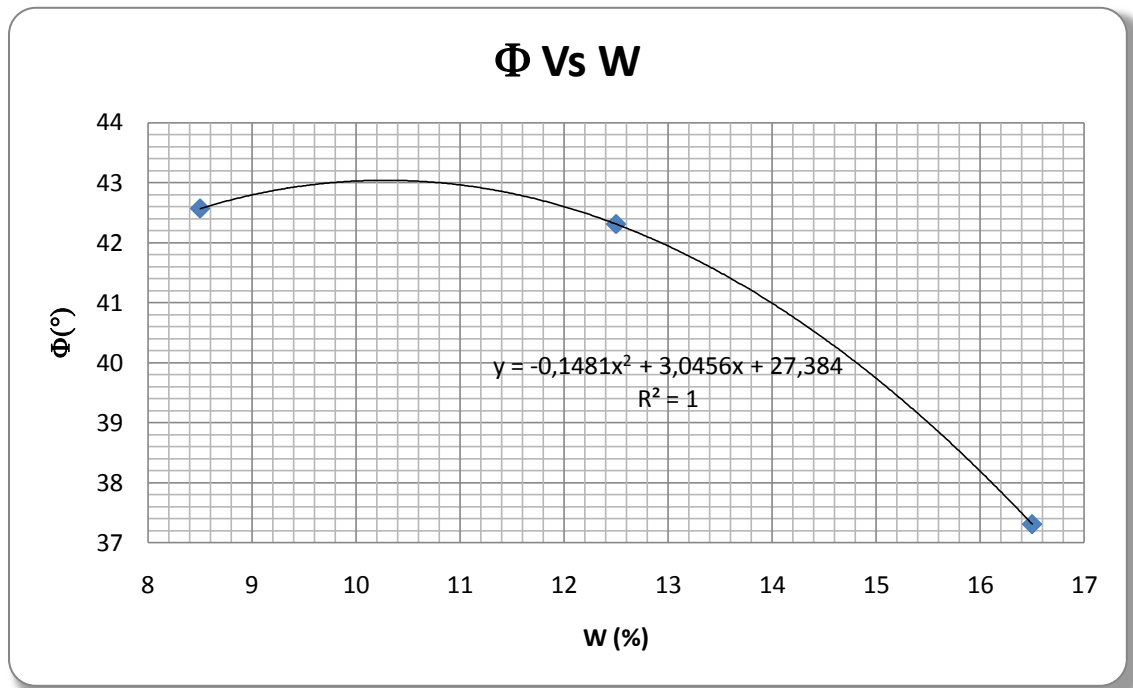


Figura 11. Relación entre  $\gamma_d$  y  $W$

Realizando una regresión polinómica, se determinó la ecuación que permite encontrar el valor máximo de la densidad seca  $\gamma_d = 2,03 \text{ g/cm}^3$  y la humedad correspondiente de 13,61%.

Así se establece que el valor máximo de la densidad seca  $\gamma_d$ , no coincide con la humedad óptima de compactación, como se esperaba inicialmente, debido a que este valor fue determinado por medio del ensayo de corte directo, por el contrario el valor de la densidad seca máxima  $\gamma_d$  hallada con la humedad óptima, se realizó por medio del ensayo Proctor Modificado.

Se aclara que los valores de  $\gamma_d$  fueron los obtenidos en el ensayo de corte directo.

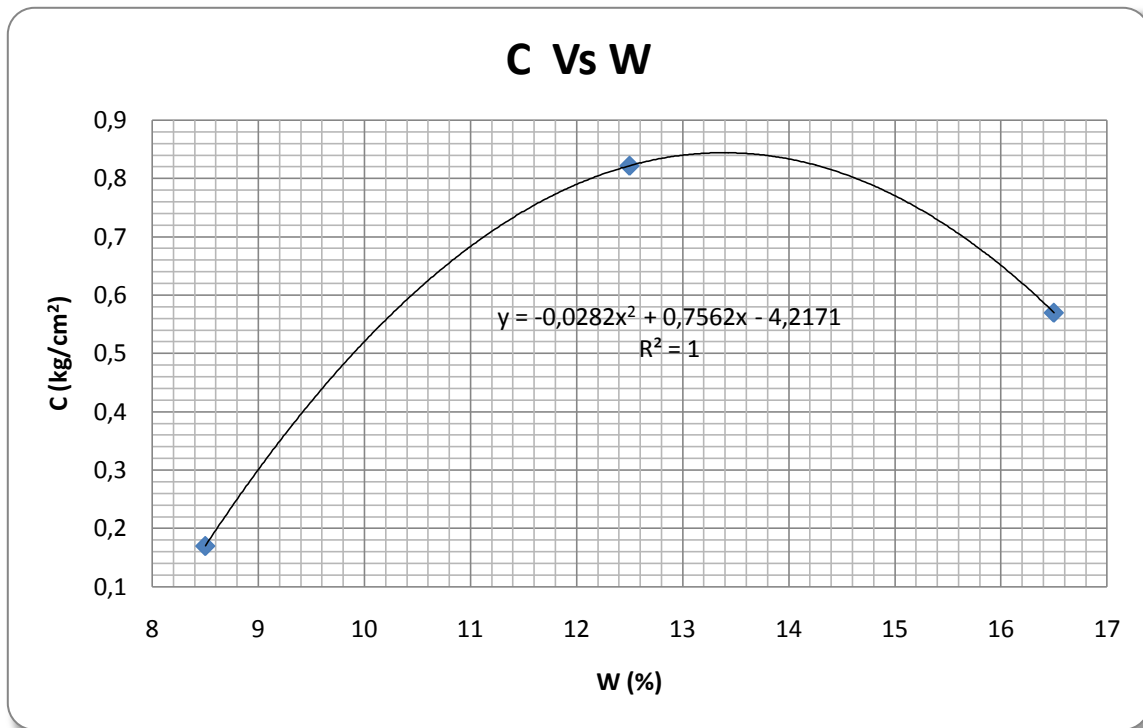


**Figura 12. Relación entre  $\phi$  y W**

Para los valores obtenidos de  $\phi$  con las diferentes humedades, se observa que el mejor ajuste corresponde a un polinomio de grado 2. Con la ecuación obtenida se calculó el valor máximo del ángulo  $\phi = 43,04^\circ$  y la humedad correspondiente de 10,28%.

La figura 12 muestra que el ángulo  $\phi$ , disminuye al aumentar la humedad W. Sin embargo podrán obtenerse otros comportamientos para humedades inferiores a las estudiadas:

1. El valor del ángulo  $\phi$  ni disminuya ni aumente.
2. Se obtengan valores de  $\phi$  menores al máximo obtenido, en tal caso se corrobora la tendencia parabólica.
3. Se obtengan valores más altos del ángulo  $\phi$  a los obtenidos en el presente; en este caso probablemente la tendencia sería lineal.



**Figura 13. Relación entre C y W**

En los ensayos de corte directo para las diferentes humedades estudiadas se encontró una dispersión grande en los resultados de la cohesión, por tal motivo no se dedicó una gran parte del presente informe a analizar variaciones de dicho parámetro con respecto a otros.

A pesar de las grandes diferencias de la cohesión obtenidas para las mismas humedades, se realizó una curva que muestra la variación de la cohesión con la humedad. Esta curva corresponde a un polinomio de grado 2, y en la cual se observa que el valor máximo de la cohesión de  $0,85 \text{ kg/cm}^2$  se obtiene para una humedad de compactación de 13,41%.

La figura 13 muestra que la humedad para la cual el valor de la cohesión es el máximo no coincide con la humedad óptima de compactación.

## 6.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN INCONFINADA.

En la tabla 10 se muestra el promedio de las humedades con las cuales se realizaron los ensayos y el promedio de la resistencia a la compresión simple obtenida para cada humedad.

Humedad %	8,50	12,50	16,50
Promedio $q_u$	8,67	14,42	9,81
Promedio W%	8,31	12,36	16,31

Tabla 10. Resultados promedios de compresión inconfiada

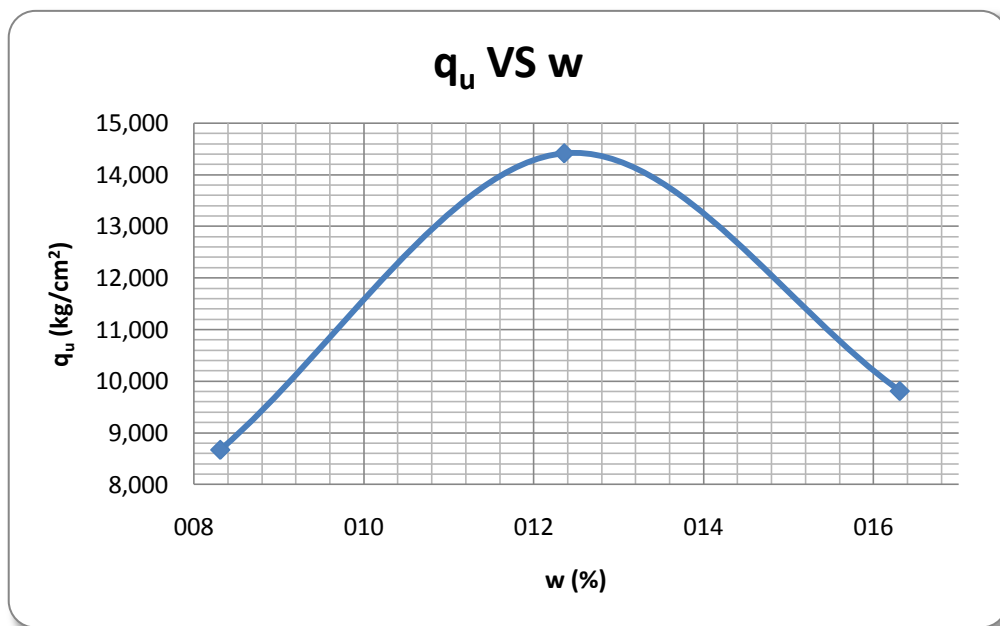


Figura 14. Relación entre  $q_u$  y W

La figura 14 muestra la variación de la resistencia con la humedad, en dicha figura se observa que el valor máximo de la resistencia a la compresión inconfiada de 14,42 kg/cm<sup>2</sup> se obtiene con la humedad óptima del ensayo Proctor Modificado.

Esta variación de la resistencia a la compresión inconfiada con respecto a la humedad, explica mejor con un polinomio de grado 2 como era de esperarse.

### 6.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ENTRE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN INCONFINADA.

En la tabla 11 están consignados los valores obtenidos en los ensayos de corte directo y compresión inconfiada. También se muestra el promedio, la desviación estándar y el porcentaje de error.

Ensayo Numero	Humedad 8,5%			Humedad 12,5%			Humedad 16,5%		
	$\phi$ (°)	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	q <sub>u</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	q <sub>u</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	C (Kg/cm <sup>2</sup> )	q <sub>u</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	38,30	0,003	5,929	37,90	0,618	13,264	49,00	0,313	9,490
2	41,70	0,304	11,789	44,80	1,543	13,648	45,70	0,218	10,222
3	39,80	0,093	12,474	41,30	0,726	15,997	41,80	0,446	11,774
4	35,50	0,062	4,530	36,10	0,874	13,623	45,40	0,372	10,668
5	42,30	0,286	5,225	39,80	0,956	16,126	32,80	1,008	8,885
6	42,20	0,049	11,027	48,00	1,372	16,180	41,30	0,721	9,423
7	32,20	0,122	8,019	45,60	0,607	16,416	36,20	0,355	8,744
8	47,60	0,034	6,363	49,20	1,606	16,097	30,50	0,479	10,324
9	40,30	0,546	8,630	28,90	0,966	14,603	41,20	0,599	9,377
10	44,30	0,044	5,950	52,40	0,122	13,218	39,60	0,466	10,857
11	58,90	0,196	8,443	39,40	0,939	16,483	45,20	0,396	9,946
12	47,40	0,099	8,050	42,70	0,706	13,894	34,00	0,743	9,982
13	37,60	0,003	11,665	41,30	0,328	16,814	37,60	0,590	7,614
14	43,30	0,128	13,369	43,40	0,757	16,378	41,70	0,623	9,889
15	40,40	0,628	10,237	43,60	1,074	13,382	34,00	0,628	8,899
16	38,30	0,366	10,893	39,80	1,134	13,073	32,40	0,707	9,475
17	38,30	0,126	5,654	46,00	1,105	14,506	28,00	0,752	11,389
18	43,30	0,027	9,731	40,90	0,840	16,580	37,80	0,659	8,353
19	36,70	0,101	6,757	45,60	1,046	12,938	30,60	0,869	9,379
20	52,00	0,109	12,380	52,60	0,002	14,874	39,40	0,491	10,893
21	51,20	0,024	8,582	35,90	1,362	13,690	38,00	0,556	8,355
22	49,70	0,105	6,837	38,80	1,204	16,639	36,30	0,595	10,881
23	47,00	0,002	5,516	37,50	1,228	14,487	34,00	0,687	10,906
24	43,70	0,348	9,759	39,90	1,059	13,396	45,10	0,208	8,984
25	45,10	0,016	11,266	39,80	0,940	13,827	27,40	0,818	9,416
26	32,70	0,131	8,980	36,60	1,004	14,710	35,30	0,735	9,991
27	40,30	0,067	7,545	42,90	0,332	13,467	29,80	0,649	10,855
28	48,90	0,032	7,453	46,70	0,268	13,884	35,10	0,636	10,682
29	34,30	0,202	5,616	45,50	1,584	6,665	34,50	0,601	9,201
30	43,80	0,348	11,420	42,20	0,601	13,617	39,60	0,242	9,427
<b>Promedio</b>	<b>42,57</b>	<b>0,15</b>	<b>8,67</b>	<b>42,17</b>	<b>0,90</b>	<b>14,42</b>	<b>37,31</b>	<b>0,57</b>	<b>9,81</b>
<b>Desviación</b>	<b>6,06</b>	<b>0,16</b>	<b>2,54</b>	<b>5,07</b>	<b>0,42</b>	<b>1,97</b>	<b>5,60</b>	<b>0,19</b>	<b>0,98</b>
<b>Error (%)</b>	<b>14,22</b>	<b>104,77</b>	<b>29,28</b>	<b>12,02</b>	<b>46,39</b>	<b>13,65</b>	<b>15,02</b>	<b>34,06</b>	<b>10,03</b>

Tabla 11. Resultados entre los ensayos de Corte Directo y Compresión Inconfiada

En la tabla 12 se muestran los valores promedio de esfuerzo  $q_u$ , ángulo de fricción interna  $\phi$  y cohesión para las respectivas humedades de compactación de este proyecto.

Humedad %	8,50	12,50	16,50
Promedio $q_u$	8,67	14,42	9,81
Promedio $\phi$ (°)	42,57	42,17	37,31
Promedio C	0,15	0,42	0,57

Tabla 12. Valores promedio de  $q_u$ ,  $\phi$  y cohesión

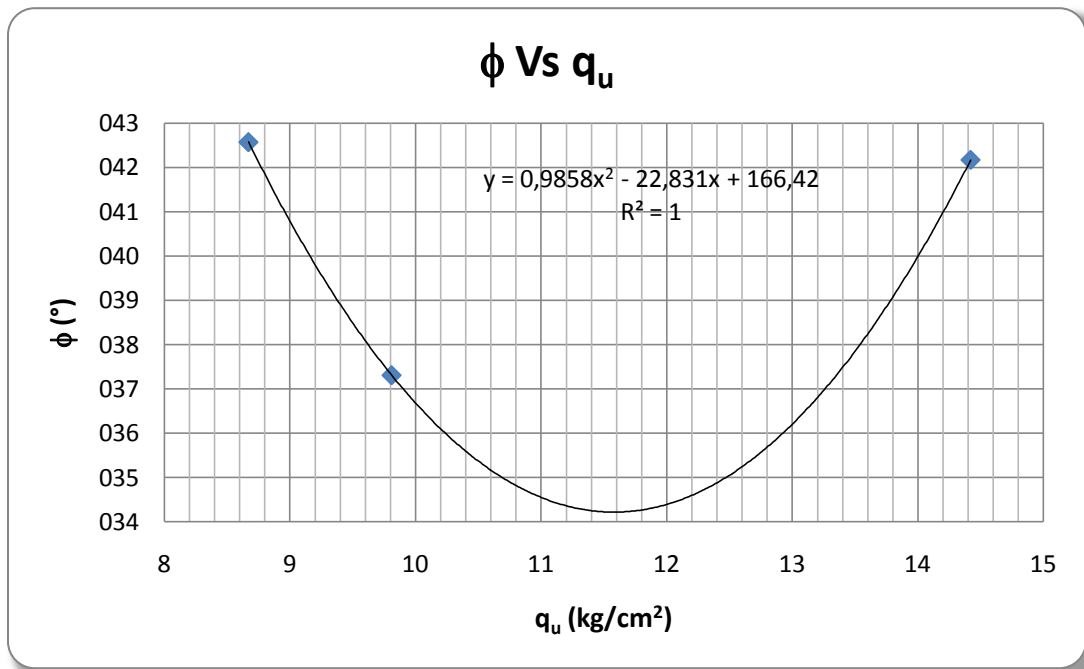
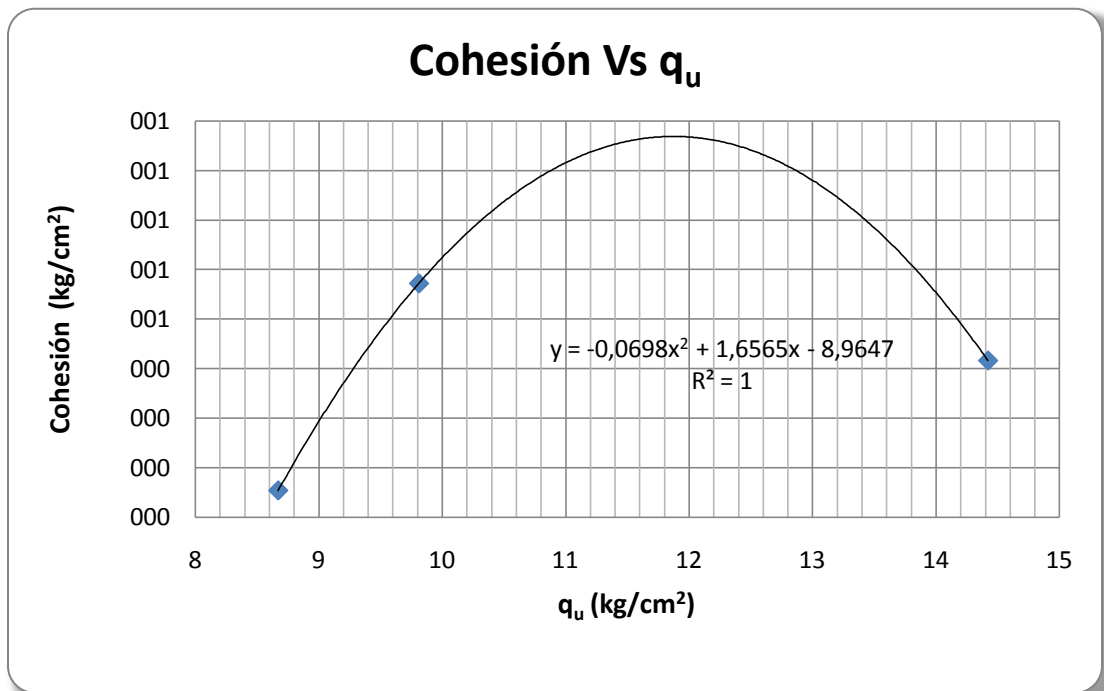


Figura 15. Relación entre  $\phi$  y  $q_u$

En la figura 15 se puede apreciar que con la humedad de 8,5% y la humedad óptima de compactación 12,5%, los valores del ángulo de fricción interna  $\phi$  son prácticamente iguales, pero el valor de la resistencia a la compresión inconfiada es mayor ( $14,42 \text{ kg/cm}^2$ ) con la humedad óptima, y con la humedad de 8,5%, la resistencia a la compresión es de  $8,67 \text{ kg/cm}^2$

Con los valores obtenidos de  $\phi$  y  $q_u$  para diferentes humedades se encontró que el mejor ajuste corresponde a un polinomio de segundo orden, el cual permite

determinar el valor de  $\phi$ , simplemente reemplazando el valor del esfuerzo  $q_u$ ; es decir que para las arenas limosas estudiadas el valor del ángulo de fricción se puede obtener por correlación con la resistencia a la compresión inconfiada. Sin embargo esta tendencia es válida únicamente para arenas limosas (SM) compactadas con humedades entre 8,5% y 16,5%, de tal manera que esta podría variar si se completa la curva con humedades menores a las estudiadas.



**Figura 16. Relación C y  $q_u$**

A pesar de la gran dispersión encontrada para los valores de la cohesión se realizó la curva de C vs  $q_u$ . Dicha curva se observa en la figura 16 y corresponde a una parábola. En la curva obtenida se observa que el valor máximo de la cohesión (0,86 kg/cm²) se logra con una resistencia a la compresión de 11,87 kg/cm².

Se observa que la variación de C vs.  $q_u$  es inversa a la variación de  $\phi$  vs  $q_u$ .

## 7. CONCLUSIONES

- En la Universidad Pontificia Bolivariana, se buscaron diferentes fuentes de materiales. En cada una de estas fuentes se tomaron muestras para realizar los ensayos de granulometría y límites; una vez clasificados los suelos de las diferentes fuentes, se escogió como material a estudiar el correspondiente al del sector del muro en tierra armada, ubicado cerca al bloque D, ya que su clasificación según el sistema unificado corresponde a arenas limosas (SM)
- Para el suelo seleccionado (Arena Limosa) se obtuvo una humedad óptima de 12,5% y una densidad máxima de  $1,92 \text{ g/cm}^3$ , por medio de ensayos de Proctor Modificado.
- Para buscar tendencias entre los diferentes parámetros geotécnicos de las arenas estudiadas, se realizaron 90 ensayos de corte directo y 90 ensayos de compresión inconfiada, de los cuales la tercera parte de estos ensayos se realizó sobre muestras compactadas con una humedad del 8,5%, otra tercera parte de los ensayos se realizó sobre muestras compactadas con una humedad del 12,5% (humedad óptima), y la tercera parte restante de los ensayos se realizó sobre muestras compactadas con una humedad del 16,5%.
- En el trabajo realizado se observó que a medida que se aumentaba la humedad a partir de un valor inicial de 8,5% y hasta un valor final de 16,5%, el valor del ángulo de fricción interna siempre disminuyó. Sin embargo también se pudo observar que para los valores de humedad de 8,5% y 12,5% el ángulo de fricción es prácticamente el mismo, es por tal motivo que la ecuación que mejor explica la variación es un polinomio de grado 2, ya que si el valor del ángulo  $\phi$  obtenido para la humedad de 8,5% hubiera

sido notablemente mayor que el encontrado para una humedad del 12,5% probablemente la línea de tendencia hubiera sido una línea recta con pendiente negativa.

- Con los resultados de los 90 ensayos de corte directo se obtuvo además la variación del peso específico seco con la humedad; esta variación se ajustó a una parábola, sin embargo vale la pena aclarar que para humedades entre 8,5% y 16,5% dicho peso específico seco no se modificó en más de 0,1 g/cm<sup>3</sup>.
- Para los suelos estudiados, se encontró que la variación entre el ángulo de fricción interna y la resistencia a la compresión inconfiada, obedece a una parábola cóncava hacia arriba. La utilidad de la relación encontrada, consiste en poder obtener el valor del ángulo de fricción interna, a partir de correlaciones con la resistencia a la compresión inconfiada.

$$Y = 0,9858x^2 - 22,831x + 166,42$$

$$R^2 = 1$$

- Para las arenas limosas que se estudiaron en el presente proyecto, se obtuvieron valores de cohesión muy diferentes para las mismas humedades, lo cual se explica en el hecho que el parámetro geotécnico más importante de dichos suelos es el ángulo de fricción interna, lo cual es el de mayor influencia en el cálculo de la capacidad de soporte, presiones laterales de tierra, factores de seguridad en taludes entre otros; siendo la cohesión un parámetro de poco aporte en los cálculos mencionados anteriormente.

## 8. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Al momento de realizar los ensayos de corte directo y compresión inconfiada, los tesisistas pudieron observar que la humedad en dichas pruebas era inferior a la deseada debido a pérdidas por manipulación y por evaporización ocasionadas por el tiempo entre la compactación y la ejecución de los ensayos. Para dar solución a este problema, fue necesario compactar las muestras con un punto porcentual por encima de la deseada. Por otra parte se adquirió una cava para almacenar las muestras, si no se podían realizar los ensayos de corte directo y compresión inconfiada inmediatamente después de la compactación.
- La Universidad Pontificia Bolivariana, aparte de su labor académica, también vende servicios de laboratorio al sector constructor y consultor de la región. Para brindar un mejor servicio los laboratorios de ingeniería civil, prestan en ocasiones los moldes para realizar ensayos de corte directo; de tal forma que al darse esta situación los estudiantes en tesis se quedan con muy pocos moldes para realizar sus trabajos. Para dar una solución a este problema, se recomienda adquirir unos moldes (60) destinado solamente a los estudiantes en tesis y otros (60) para la venta de servicios.
- Se recomienda adquirir o construir tubos media caña para recuperar muestras destinadas al ensayo de compresión inconfiada, debido a que con los tubos con los cuales cuenta la universidad se dificulta la extracción de las muestras, más aún teniendo en cuenta que el extractor de muestras con el que se cuenta, tiene una excentricidad.
- Debido al uso frecuente de la máquina multiusos para suelos marca GEOTEST, se recomienda sea calibrada por lo menos una vez al año, para así obtener resultados confiables.

- En una futura investigación, se recomienda estudiar humedades inferiores a las del presente trabajo, con el fin de comprobar el comportamiento exacto en ángulo de fricción ( $\phi$ ) y la resistencia a la compresión  $q_u$ .
- Se recomienda para futuras investigaciones, que cada vez que se extraiga material de la fuente, se le hagan estudios de control para garantizar que el material es el mismo, y no confiar en la apariencia del material.
- Debido a la importancia y el nombre que tiene la Universidad Pontificia Bolivariana a nivel regional y nacional y más aun teniendo en cuenta la acreditación de la facultad de ingeniería civil en el año 2009, se recomienda la adecuación de laboratorios exclusivos para la parte de investigación, para no obstaculizar las labores académicas y venta de servicios.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FLOREZ JAMSA, Sara, y VILLAMIZAR MENDEZ, Yelissa. Incidencia de la compactación en la resistencia al corte de arcillas arenosas: Universidad Pontificia Bolivariana. 2007.
- CEPEDA VARGAS, Ricardo, y TRUJILLO BOLIVAR, Juan D. Incidencia de la compactación en la resistencia al corte de arcillas de baja compresibilidad: Universidad Pontificia Bolivariana. 2007.
- JUAREZ BADILLO - RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos .Editorial Limusa S.A. Grupo Noriega Editores. Tomo I. 1997
- BRAJAM. DAS. Fundamentos De Ingeniería Geotécnica. Editorial Thomson Learning. 2001.
- CRESPO V. CARLOS. Mecánica De Suelos Y Cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa S.A. 1990.

# **ANEXO A**

**REGISTRO FOTOGRÁFICO**

## ORIGEN DEL MATERIAL



**Figura 1.** Talud donde se encuentra el materia a utilizar.



**Figura 2.** Forma en que se extrae el materia que se va a utilizar.

## GRANULOMETRIA



**Figura 3.** Lavado del material seleccionado por el tamiz N° 200.



**Figura 4.** Selección de tamices que se utilizarán, previamente ordenados.

## PLASTICIDAD



**Figura 5.** Material listo para ejectar en la copa de casagrande.



**Figura 6.** resultado obtenido del ensayo de plasticidad.



**Figura 7.** Horno utilizado para el secado de las muestras.



**Figura 8.** Balanza digital para el control del peso de cada una de las capsulas.

## CORTE DIRECTO



**Figura 9.** Material seleccionado y mezclado con humedad específica.



**Figura 10.** Compactación del suelo con 5 capas de 56 golpes cada una.



**Figura 11.** Muestras de un corte que están listas para ser falladas en la máquina de corte directo



**Figura 12.** Montaje de la muestra y aplicación de carga y velocidad.

## ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA



**Figura 13.** Toma de muestras para el ensayo de compresión simple.



**Figura 14.** Muestras de compresión inconfiada.



**Figura 15.** Toma de resultados de la máquina de Geotest.



**Figura 16.** Muestra Fallada.

# ANEXO B

ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA

# ANEXO C

ENSAYOS DE LÍMITES DE ATTERBERG

# ANEXO D

ENSAYOS DE PROCTOR MODIFICADO

# ANEXO E

ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

# ANEXO F

ENSAYOS DE COMPRESIÓN INCONFINADA

# **ANEXO G**

**NORMAS DE INVIAS I.N.V. E – 123 - 07  
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA**

# ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

I.N.V. E - 123

## 1. OBJETO

- 1.1. El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.
- 1.2. Esta norma describe el método para determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el de 75  $\mu\text{m}$  (No.200).

## 2. EQUIPO

- 2.1. Dos balanzas. Una con sensibilidad de 0.01 g para pesar material que pase el tamiz de 2 mm (No.10). Otra con sensibilidad 0.1 % del peso de la muestra, para pesar los materiales retenidos en el tamiz de 2 mm (No.10).
- 2.2. Tamices de malla cuadrada:

75 mm (3"), 50 mm (2"), 37.5 mm (1-1/2"), 25 mm (1"), 19.0 mm (3/4"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (No.4), 2.00 mm (No.10) 850  $\mu\text{m}$  (No.20), 425  $\mu\text{m}$  (No.40), 250  $\mu\text{m}$  (No.60), 106  $\mu\text{m}$  (No.140) y 75  $\mu\text{m}$  (No.200).

Se puede usar, como alternativa, una serie de tamices que, al dibujar la gradación, dé una separación uniforme entre los puntos del gráfico; esta serie estará integrada por los siguientes:

75 mm (3"), 37.5 mm (1-1/2"), 19.0 mm (3/4"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (No.4), 2.36 mm (No.8), 1.10 mm (No.16), 600 µm (No.30), 300 µm (No.50), 150 µm (No.100), 75 µm (No.200).

- 2.3. Horno, capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta de  $110 \pm 5$  °C ( $230 \pm 9$  °F).
- 2.4. Envases, adecuados para el manejo y secado de las muestras.
- 2.5. Cepillo y brocha, para limpiar las mallas de los tamices.

### **3. MUESTRA**

- 3.1. Según sean las características de los materiales finos de la muestra, el análisis con tamices se hace, bien con la muestra entera, o bien con parte de ella después de separar los finos por lavado. Si la necesidad del lavado no se puede determinar por examen visual, se seca en el horno una pequeña porción húmeda del material y luego se examina su resistencia en seco rompiéndola entre los dedos. Si se puede romper fácilmente y el material fino se pulveriza bajo la presión de aquellos, entonces el análisis con tamices, se puede efectuar sin previo lavado.
- 3.2. Prepárese una muestra para el ensayo como se describe en la preparación de muestras para análisis granulométrico Norma INV E-106, la cual estará constituida por dos fracciones: Una retenida sobre el tamiz de 2 mm (No.10) y otra que pasa dicho tamiz. Ambas fracciones se ensayarán por separado.

**3.3.** El peso del suelo secado al aire y seleccionado para el ensayo, como se indica en la Norma INV E-106, será suficiente para las cantidades requeridas para el análisis mecánico, como sigue:

**3.3.1.** Para la porción de muestra retenida en el tamiz de 2 mm (No.10) el peso dependerá del tamaño máximo de las partículas de acuerdo con la Tabla No.1.

**TABLA No.1**

Diámetro Nominal de las partículas más grandes mm (pulg)	Peso mínimo aproximado de la porción Gramos, g
(3/8")	500
(3/4")	1000
(1")	2000
37.5 (1 1/2")	3000
(2")	4000
75.0 (3")	5000

**3.3.2.** El tamaño de la porción que pasa tamiz de 2 mm (No.10) será aproximadamente de 115 g, para suelos arenosos, y de 65 g para suelos arcillosos y limosos.

**3.4.** En la Norma INV E-106, se dan indicaciones para la pesada del suelo secado al aire y seleccionado para el ensayo, así como para la separación del suelo sobre el Tamiz de 2 mm (No.10) por medio del tamizado en seco, y para el lavado y pesado de las fracciones lavadas y secadas retenidas en dicho tamiz. De estos dos pesos, los porcentajes, retenido y que pasa el Tamiz de 2 mm (No.10), pueden calcularse de acuerdo con el numeral 6.1.

Se puede tener una comprobación de los pesos, así como de la completa pulverización de los terrones, pesando la porción de muestra que pasa el Tamiz de 2 mm (No.10) y agregándole este valor al peso de

la porción de muestra lavada y secada en el horno, retenida en el Tamiz de 2 mm (No.10).

#### **4. ANÁLISIS POR MEDIO DE TAMIZADO DE LA FRACCIÓN RETENIDA EN EL TAMIZ DE 2.00 mm (No.10)**

**4.1.** Sepárese la porción de muestra retenida en el tamiz de 2 mm (No.10) en una serie de fracciones usando los tamices de:

75 mm (3"), 50 mm (2"), 37.5 mm (1- $\frac{1}{2}$ "), 25.0 mm (1"), 19.0 mm (3/4"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (No.4) y 2.00 mm (No.10), o los que sean necesarios dependiendo del tipo de muestra, o dependiendo de las especificaciones para el material que se ensaya.

**4.2.** En la operación de tamizado manual se mueve el tamiz o tamices de un lado a otro y recorriendo circunferencias de forma que la muestra se mantenga en movimiento sobre la malla. Debe comprobarse al desmontar los tamices que la operación está terminada; esto se sabe cuando no pasa más del 1 % de la parte retenida al tamizar durante un minuto, operando cada tamiz individualmente. Si quedan partículas apresadas en la malla, deben separarse con un pincel o cepillo y reunir las con lo retenido en el tamiz.

Cuando se utilice una tamizadora mecánica, se pondrá a funcionar por diez minutos aproximadamente; el resultado se puede verificar usando el método manual.

**4.3.** Se determina el peso de cada fracción en una balanza con una sensibilidad de 0.1 % La suma de los pesos de todas las fracciones y el peso inicial de la muestra no debe diferir en más de 1 %

## **5. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA FRACCIÓN FINA**

- 5.1.** El análisis granulométrico de la fracción que pasa el tamiz de 2 mm (No.10) se hará por tamizado y/o sedimentación según las características de la muestra y según la información requerida.
- 5.1.1.** Los materiales arenosos que contengan muy poco limo y arcilla, cuyos terrones en estado seco se desintegren con facilidad, se podrán tamizar en seco.
- 5.1.2.** Los materiales limo arcillosos, cuyos terrones en estado seco no rompan con facilidad, se procesarán por la vía húmeda.
- 5.1.3.** Si se requiere la curva granulométrica completa incluyendo la fracción de tamaño menor que el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200), la gradación de ésta se determinará por sedimentación, utilizando el hidrómetro para obtener los datos necesarios. Ver Norma de Ensayo INV E-124.
- 5.1.4.** Se puede utilizar procedimientos simplificados para la determinación del contenido de partículas menores de un cierto tamaño, según se requiera.
- 5.1.5.** La fracción de tamaño mayor que el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200) se analizará por tamizado en seco, lavando la muestra previamente sobre el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200)
- 5.2.** Procedimiento para el análisis granulométrico por lavado sobre el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200).
- 5.2.1.** Se separan mediante cuarteo, 115 g para suelos arenosos y 65 g para suelos arcillosos y limosos, pesándolos con exactitud de 0.01 g.
- 5.2.2.** Humedad higroscópica.- Se pesa una porción de 10 a 15 g de los cuarteos anteriores y se seca en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C ( $230 + 9$  °F). Se pesan de nuevo y se anotan los pesos.

- 5.2.3.** Se coloca la muestra en un recipiente apropiado, cubriéndola con agua y se deja en remojo hasta que todos los terrones se ablanden.
- 5.2.4.** Se lava a continuación la muestra sobre el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200) con abundante agua, evitando frotarla contra el tamiz y teniendo mucho cuidado de que no se pierda ninguna partícula de las retenidas en él.
- 5.2.5.** Se recoge lo retenido en un recipiente, se seca en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C ( $230 \pm 9$  °F) y se pesa.
- 5.2.6.** Se tamiza en seco siguiendo el procedimiento indicado en las secciones 4.2 y 4.3

## **6. CALCULOS**

- 6.1.** Valores de análisis de tamizado para la porción retenida en el Tamiz de 2 mm (No.10).
  - 6.1.1.** Se calcula el porcentaje que pasa el tamiz de 2 mm (No.10) dividiendo el peso que pasa dicho tamiz por el del suelo originalmente tomado y se multiplica el resultado por 100. Para obtener el peso de la porción retenida en el mismo tamiz, réstese del peso original, el peso del pasante por el Tamiz de 2 mm (No.10).
  - 6.1.2.** Para comprobar el peso total de suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4), se agrega al peso del material que pasa el tamiz de 2 mm (No.10), el peso de la fracción que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4) y que queda retenida en el de 2 mm (No.10). Para comprobar el material que pasa por el tamiz de 9.5 mm (3/8"), se agrega al peso total del suelo que pasa por el tamiz de 4.75 mm (No.4) el peso de la fracción que pasa el tamiz de 9.5 mm (3/8") y que queda retenida en el de 4.75 mm (No.4). Para los demás tamices continúese el cálculo de la misma manera.

**6.1.3.** Para determinar el porcentaje total que pasa por cada tamiz, se divide el peso total que pasa (sección 6.1.2) por el peso total de la muestra y se multiplica el resultado por 100.

**6.2.** Valores del análisis por tamizado para la porción que pasa el tamiz de 2 mm (No.10).

Se calcula el porcentaje de material que pasa por el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200) de la siguiente forma:

$$\% \text{ Pasa } 75\mu\text{m} = \frac{\text{Peso Total} - \text{Peso Ret. en el tamiz de } 75 \mu\text{m}}{\text{Peso Total}} * 100$$

Se calcula el porcentaje retenido sobre cada tamiz en la siguiente forma:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso Retenido en el tamiz}}{\text{Peso Total}} * 100$$

Se calcula el porcentaje más fino. Restando en forma acumulativa de 100% los porcentajes retenidos sobre cada tamiz.

$$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ Ret. acumulado}$$

**6.3.** Porcentaje de humedad higroscópica.- La humedad higroscópica se considera como la pérdida de peso de una muestra secada al aire cuando se seca posteriormente al horno, expresada como un porcentaje del peso de la muestra secada al horno. Se determina de la manera siguiente.

$$\% \text{ Humedad Higroscopica} = \frac{W - W_1}{W_1} * 100$$

Donde:

W = Peso de suelo secado al aire

$W_1$  = Peso de suelo secado en el horno

## **7. OBSERVACIONES**

**7.1.** El informe deberá incluir lo siguiente:

**7.1.1.** El tamaño máximo de las partículas contenidas en la muestra.

**7.1.2.** Los porcentajes retenidos y/o que pasan, para cada uno de los tamices utilizados.

**7.1.3.** Toda información que se juzgue de interés.

Los resultados se presentarán: (1) en forma tabulada, o (2) en forma gráfica; siendo esta última forma, la indicada cada vez que el análisis comprenda un ensayo completo de sedimentación.

Las pequeñas diferencias resultantes en el empate de las curvas obtenidas por tamizado y por sedimento respectivamente, se corregirán en forma gráfica.

**7.2.** Los siguientes errores posibles producirán determinaciones imprecisas en un análisis granulométrico por tamizado.

**7.2.1.** Aglomeraciones de partículas que no han sido completamente disgregadas. Si el material contiene partículas finas plásticas, la muestra debe ser disgregada antes del tamizado.

**7.2.2.** Tamices sobrecargados. Este es el error más común y más serio asociado con el análisis por tamizado y tenderá a indicar que el material ensayado es más grueso de lo que en realidad es. Para evitar esto las muestras muy grandes deben ser tamizadas en varias porciones y las porciones retenidas en cada tamiz se juntarán luego para realizar la pesada.

- 7.2.3. Los tamices han sido agitados por un periodo demasiado corto o con movimientos horizontales o rotacionales inadecuados. Los tamices deben agitarse de manera que las partículas sean expuestas a las aberturas del tamiz con varias orientaciones y así tengan mayor oportunidad de pasar a través de él.
- 7.2.4. La malla de los tamices está rota o deformada; los tamices deben ser frecuentemente inspeccionados para asegurar que no tienen aberturas más grandes que la especificada.
- 7.2.5. Pérdidas de material al sacar el retenido de cada tamiz.
- 7.2.6. Errores en las pesadas y en los cálculos.

## **8. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS**

ASTM D 422-63 (Reaprobada 1998)

AASHTO T 88 00 (2004)

# ANEXO H

**NORMAS DE INVIAS I.N.V. E – 125 – 07**

**NORMAS DE INVIAS I.N.V. E – 126 – 07**

**ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG**

# DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS

I.N.V. E – 125 – 07

## 1. OBJETO

- 1.1. El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.
- 1.2. Para los fines de esta especificación, cualquier valor observado o calculado deberá aproximarse a la “unidad más cercana”.
- 1.3. Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es de responsabilidad de quien la emplee, el establecimiento de prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y la aplicación de limitaciones regulatorias con anterioridad a su uso.

## 2. EQUIPO

- 2.1. Vasija de evaporación – Una vasija de porcelana de 115 mm (4½") de diámetro, aproximadamente.
- 2.2. Espátula – Una espátula de hoja flexible de 75mm a 100 mm (3"a 4") de longitud y 20mm (3/4") de ancho, aproximadamente.
- 2.3. Aparato del Límite Líquido
  - 2.3.1. De operación manual – Es un aparato consistente en una cazuela de bronce con sus aditamentos, construido de acuerdo con las dimensiones señaladas en la Figura 1.
  - 2.3.2. De operación mecánica – Es un aparato equipado con un motor para producir la elevación y posterior caída de la cazuela (golpes) a una altura y velocidad controladas. Consta de una cazuela de bronce con los aditamentos y las dimensiones de la Figura 1. El aparato debe

dar los mismos valores para el límite líquido que los obtenidos con el aparato de operación manual.

**Nota 1.-** La base del aparato medidor del límite líquido debe tener una resiliencia entre 80 y 90 por ciento, cuando ha sido determinada de acuerdo con el procedimiento indicado en el Apéndice.

**2.4.** Ranurador – Un ranurador curvo (trapezoidal), conforme con las dimensiones exactas indicadas en las Figura 1. El calibrador no tiene que ser parte del ranurador.

**Nota 2.-** El ranurador plano no debe ser usado en reemplazo del ranurador curvo. Hay estudios que indican que el límite líquido aumenta levemente al utilizar el plano en lugar del curvo.

**2.5.** Calibrador – Ya sea incorporado o separado del ranurador, de acuerdo con la dimensión exacta "d", mostrada en la Figura 1, el cual puede ser, si fuere separado, una barra de metal de  $10.0 \pm 0.2\text{mm}$  ( $0.394 \pm 0.008$ ") de espesor y de aproximadamente 50 mm (2") de longitud.

**2.6.** Recipientes – Hechos de material resistente a la corrosión, y cuya masa no cambie con calentamientos y enfriamientos repetidos. Deben tener tapas que ajusten bien, para evitar pérdidas de humedad de las muestras antes de la pesada inicial y para evitar la absorción de humedad de la atmósfera tras el secado y antes de la pesada final. Se requiere un recipiente para cada determinación del contenido de agua.

**2.7.** Balanza – Una balanza con una sensibilidad de 0.01 gr.

**2.8.** Horno – Un horno termostáticamente controlado, capaz de mantener temperaturas de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ) para secar las muestras.

## MÉTODO A

### 3. MUESTRA

Se toma una muestra que pese aproximadamente 100 g. de una porción de material completamente mezclado que pase el tamiz de 0.425 mm (No.40), obtenido de acuerdo con el método descrito en las normas INV E – 106 e INV E – 107.

### 4. AJUSTE DEL APARATO DEL LÍMITE LÍQUIDO

- 4.1. Se deberá inspeccionar el aparato de límite líquido para verificar que se halle en buenas condiciones de trabajo; que el pin que conecta la cazuela no esté tan gastado; que tenga juego lateral; que los tornillos que conectan la cazuela a su soporte estén ajustados; que los puntos de contacto en la cazuela y en la base no presenten un desgaste excesivo; que el borde de la cazuela no se encuentre desgastado y que la zona de la cazuela donde se ejecuta la ranura a la muestra de suelo no se encuentre gastada por el uso prolongado. Además, se debe inspeccionar el ranurador para verificar que las dimensiones son las exactas que se indican en la Figura 1.

Se considera que el desgaste es excesivo, cuando el diámetro del punto de contacto de la cazuela con la base excede de 13mm (0.5") o cuando cualquier punto sobre el borde de la cazuela se ha desgastado aproximadamente en la mitad del espesor original. Aun cuando se aprecie una ligera ranura en el centro de la cazuela, ésta no es objetable. Pero si la ranura se hace pronunciada antes de que aparezcan otros signos de desgaste, se considera que la cazuela está excesivamente gastada y deberá ser reemplazada.

Una base excesivamente desgastada puede pulirse, pero hasta cuando la tolerancia mostrada en la Figura 1 no exceda de 2.5 mm (0.1") y la distancia entre la excéntrica de la cazuela y la base se mantenga dentro de la tolerancia especificada en la Figura 1

- 4.2. Por medio del calibrador del mango del ranurador y de la platina de ajuste H (Figura 1), se ajusta la altura a la cual levanta la cazuela, de tal manera que el punto de la cazuela que hace contacto con la base esté a  $10.0 \pm 0.2\text{mm}$  (0.394") sobre ésta. Se asegura la platina de ajuste H, apretando los tornillos I. Con el calibrador aún colocado, se comprueba el ajuste girando la manija rápidamente varias veces. Si el ajuste es correcto, se oirá un sonido de roce cuando la excéntrica golpea contra la cazuela. Si la cazuela se levanta del calibrador o no se oye ruido, se debe hacer un nuevo ajuste.

## 5. PROCEDIMIENTO CUANDO SE UTILIZA EL RANURADOR CURVO.

- 5.1. Se coloca la muestra de suelo en la vasija de evaporación y se mezcla completamente con 15 a 20 ml de agua destilada, agitándola, amasándola y tajándola con una espátula en forma alternada y repetida. Realizar más adiciones de agua en incrementos de 1 a 3 ml. Se mezcla completamente cada incremento de agua con el suelo como se ha descrito previamente, antes de cualquier nueva adición.

**Nota 3.-** Algunos suelos absorben el agua lentamente, por lo cual es posible que se adicionen los incrementos de agua tan rápidamente que se obtenga un límite líquido falso. Esto puede evitarse mezclando más y dando un mayor tiempo de absorción, (1 hora aproximadamente).

Se puede usar agua potable para las pruebas rutinarias, si pruebas de comparación no muestran diferencias entre los resultados obtenidos usando agua potable, agua destilada o agua desmineralizada. Sin embargo pruebas para confirmación o de discusión se deben hacer usando agua destilada o desmineralizada.

- 5.2.** Cuando agua suficiente ha sido mezclada perfectamente con el suelo hasta formar una pasta uniforme de consistencia dura, se coloca una cantidad adecuada de esta mezcla en la cazuela encima del punto donde ésta descansa en la base y se comprime y extiende con la espátula para nivelarla y a la vez, dejarla con una profundidad de 10 mm en el punto de su máximo espesor. Se debe usar el menor número posible de pasadas con la espátula, evitando atrapar burbujas de aire en la masa de suelo. El suelo excedente se debe devolver al recipiente mezclador y se debe tapar con el fin de que se retenga la humedad de la muestra. Se divide el suelo en la cazuela de bronce con una firme pasada del ranurador a lo largo del diámetro y a través de la línea central de la masa del suelo, de modo que se forme una ranura limpia y de dimensiones apropiadas como se ve en la Figura 2. Para evitar rasgar los lados de la ranura y el desmoronamiento de la pasta del suelo en la cazuela de bronce, se permite hacer hasta 6 pasadas, de adelante hacia atrás o de atrás hacia adelante, contando cada recorrido como una pasada; con cada pasada el ranurador debe penetrar un poco más profundo, hasta que la última pasada de atrás hacia adelante limpie el fondo de la cazuela. La ranura se deberá hacer con el menor número posible de pasadas.

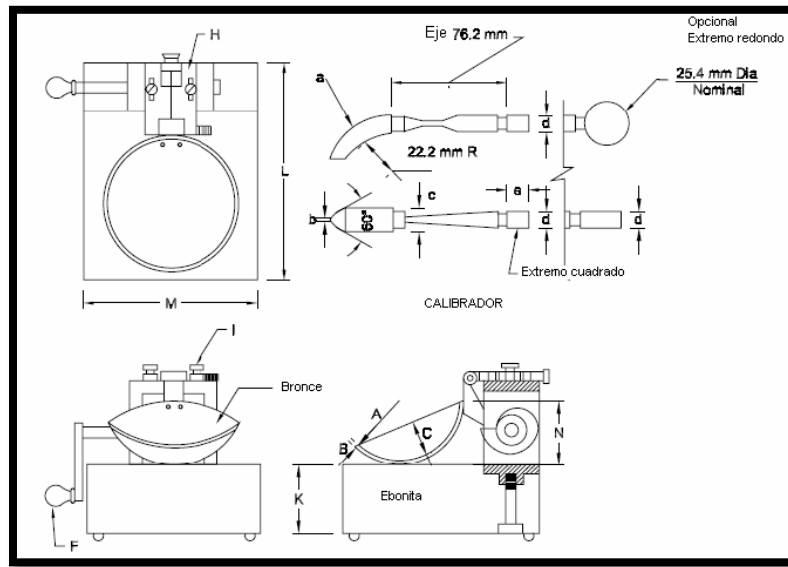


Figura 1. Aparato manual para límite líquido

Aparato de límite líquido				Ranurador							
Conjunto de la cazuela			Base		Extremo Curvado						
Dimensiones	A	B	C	N	K	L	M	a	b	c	d
Descripción	Radio de la copa	Espesor de la copa	Profundidad de la copa	Copa desde la guía del elevador hasta la base	Espesor Largo	Ancho	Espesor	Borde cortante	Ancho	Diámetro	
Métrico, mm	54	2	27	47	50	150	125	10	2	13.5	10
Tolerancia, mm	2	0.1	1	1.5	5	5	5	0.1	0.1	0.1	0.2
Inglés, pulg	2.13	0.079	1.063	1.85	1.97	5.9	4.92	0.394	0.079	0.531	0.3937
Tolerancia, pulg		0.004	0.04	0.06	0.2	0.2	0.2	0.004	0.004	0.004	0.008

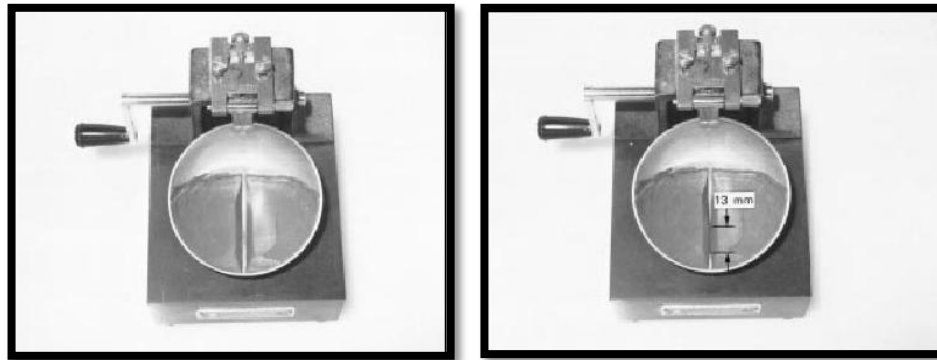
Nota:

La platina "H" debe incluir un tornillo de seguridad (I).

Cuando se usan ranuradores podrá admitirse +0.1 mm de tolerancia para "b".

Las patas para la base deberán ser de material resistente.

Las unidades métricas son las dimensiones requeridas; las inglesas son solo aproximadas.



**Figura 2.** Equipo de Límite líquido con muestra de su suelo dividida.

- 5.3.** Se levanta y golpea la cazuela girando la manija F, a una velocidad de dos (2) revoluciones por segundo, hasta que las dos mitades de la pasta de suelo se pongan en contacto en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia de cerca de 13mm (0.5"). Se anota el número de golpes requeridos para cerrar la ranura.

Algunos suelos tienden a deslizarse en lugar de fluir sobre la superficie de la cazuela. Cuando esto ocurra, se deberá agregar más agua a la muestra y mezclar de nuevo. Se coloca nuevamente el suelo humedecido en la cazuela, se hace la ranura con el ranurador y se repite la Sección 5.2. Si el suelo se sigue deslizando sobre la cazuela a un número de golpes inferior a 25, este ensayo no es aplicable y se deberá indicar que el Límite Líquido no se puede determinar.

- 5.4.** Se saca una tajada de suelo, aproximadamente del ancho de la espátula; se toma de uno y otro lado y en ángulo recto con la ranura incluyendo la porción de ésta en la cual se hizo contacto y se coloca en un recipiente adecuado.

Se pesa y se anota el valor. Se coloca el suelo con el recipiente dentro del horno a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) hasta obtener una masa constante y se vuelve a pesar tan pronto como se haya enfriado antes de que pueda

haber absorbido humedad higroscópica. Se anota esta masa, así como la pérdida de masa debida al secamiento y la masa del agua.

- 5.5. Se transfiere el suelo sobrante en la cazuela de bronce a la cazuela de porcelana. La cazuela y el ranurador se lavan y se secan para prepararlas para el tanteo siguiente.
- 5.6. Se repite la operación anterior por lo menos en dos ensayos adicionales con el suelo restante en la vasija de porcelana, al cual se le agrega agua suficiente para ponerlo en un estado de mayor fluidez. El objeto de este procedimiento es obtener muestras de tal consistencia que al menos una de las determinaciones del número de golpes requeridos para cerrar la ranura del suelo se halle en cada uno de los siguientes intervalos: 25-35; 20-30; 15-25, de manera que la oscilación entre las 3 determinaciones sea de, por lo menos, 10 golpes.

## **6. PROCEDIMIENTO CUANDO SE UTILIZA EL RANURADOR PLANO.**

El procedimiento debe ser igual al descrito en la Sección 5 excepto en la Sección 5.2 para la formación de la ranura. Ésta se forma en la pasta de suelo hundiendo el lado biselado del ranurador hacia delante en una línea que va desde el punto más alto hasta el más bajo del borde de la cazuela. Al hacer la ranura se sostiene el ranurador contra la superficie de la cazuela y se forma un arco, manteniendo el ranurador perpendicular a la superficie de la cazuela durante su movimiento. En suelos en los que no se pueda hacer la ranura en una sola pasada sin desagarrarlo, se corta la ranura con varias pasadas del ranurador. También se puede hacer una ranura ligeramente menor usando una espátula y usando luego el ranurador hasta completar la dimensión deseada.

Se debe tener un cuidado extremo con el fin de evitar que la pasta de suelo se deslice sobre la superficie de la cazuela.

## 7. CÁLCULOS

- 7.1. Se calcula el contenido de humedad del suelo, expresándolo como porcentaje de la masa del suelo secado en el horno, como sigue:

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa del suelo secado al horno}} \times 100$$

El porcentaje de humedad se debe calcular con aproximación al entero más próximo.

- 7.2. Preparación de la curva de fluidez – La "curva de fluidez", que representa la relación entre el contenido de humedad y el correspondiente número de golpes de la cazuela de bronce, se dibuja en un gráfico semilogarítmico, con el contenido de humedad como abscisa sobre la escala aritmética y el número de golpes como ordenada sobre la escala logarítmica. La curva de flujo es una línea recta promedia que pasa tan cerca, como sea posible, de los tres o más puntos dibujados.
- 7.3. Límite Líquido – El contenido de humedad correspondiente a la intersección de la curva de flujo con la ordenada de 25 golpes se toma como Límite Líquido del suelo y se aproxima este valor al número entero más cercano.

## MÉTODO B

### 8. MUESTRA

Se toma una muestra con una masa de aproximadamente 50 g, como se explica en la Sección 3.

## **9. PROCEDIMIENTO**

- 9.1.** El procedimiento será igual al descrito en las Secciones 5.1 a 5.5, a excepción de la humedad añadida a la muestra que será de 8 a 10 ml y de la muestra para humedad, tomada de acuerdo con la Sección 5.4, la que se tomará sólo para el ensayo aceptado, descrito en 9.3.
- 9.2.** Se deberán observar por lo menos dos cierres de la ranura antes de que se acepte una de ellas para anotarla, con el fin de verificar que el número de golpes es verdaderamente característico del suelo que se está ensayando.
- 9.3.** Para lograr una precisión igual a la obtenida por el método normal de los tres (3) puntos (Método A), el número de golpes aceptado para el ensayo debe restringirse a un rango entre 22 y 28. Después de obtener el cierre preliminar de la ranura en el rango aceptable de golpes, se devuelve el resto de suelo que queda en la cazuela al recipiente para mezclar sin añadirle más agua y se repite el procedimiento como se explica en las Secciones 5.2 y 5.3. Si el segundo cierre ocurre dentro del rango aceptable (22-28 golpes inclusive) y el segundo cierre no difiere en más de dos golpes (2) del primero, se toma un espécimen para la determinación del contenido de agua como se indica en la Sección 5.4.
- 9.4.** Se aceptarán cierres de la ranura que requieran de 15 a 40 golpes, siempre y cuando que se toleren variaciones de  $\pm 5\%$  en relación con el verdadero Límite Líquido.

## **10. CÁLCULOS**

El contenido de humedad se calcula en la forma indicada en la Sección 7.1.

## 11. LIMITE LÍQUIDO

- 11.1.** El Límite Líquido se puede determinar por uno de los siguientes métodos: mediante el nomograma (Figura 3); por medio del diagrama de la Figura 4, o por cualquier otro método de cálculo que dé valores de Límite Líquido con la misma precisión. El método normal de los tres (3) puntos debe emplearse como ensayo de referencia para resolver cualquier duda.
- 11.2.** La clave de la Figura 3 indica el modo de usar el nomograma. (Pendiente media).
- 11.3.** El diagrama de la Figura 4 (curva de fluidez múltiple) se usa dibujando sobre el mismo, un punto que represente el contenido de humedad. versus el número de golpes. Luego se traza una línea por dicho punto, que sea paralela a la curva más cercana del diagrama. El Límite Líquido será el contenido de humedad correspondiente a la intersección de esta línea con la de 25 golpes.
- 11.4.** El Límite Líquido también puede ser calculado utilizando el método del factor corrector K (Tabla 1) el cual usa el contenido de humedad de la muestra del punto considerado para el cálculo, multiplicado por el factor k correspondiente al número de golpes requeridos para el segundo cierre de la ranura, descrito en la sección 9.3.

$$LL = W_N \times \left( \frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad \text{o} \quad LL = K \times W_N$$

donde:

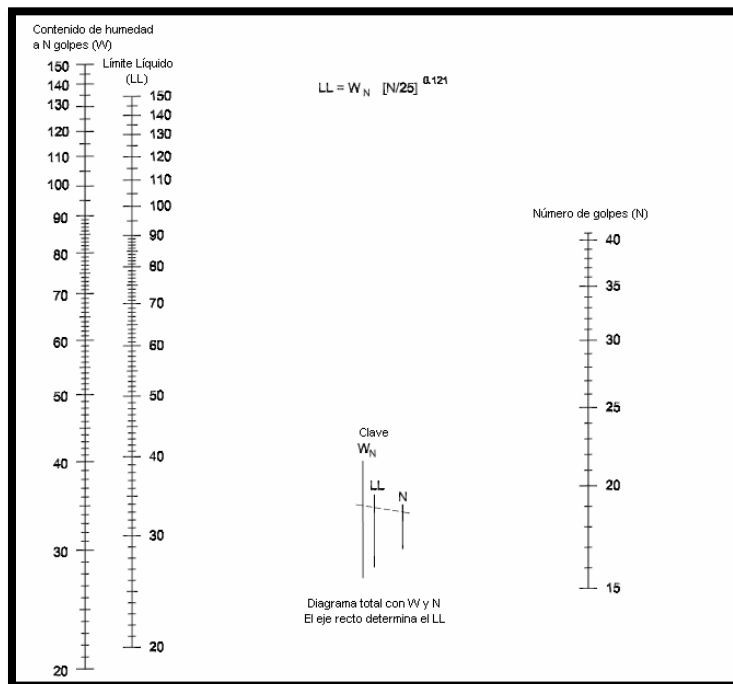
N = número de golpes para que se cierre la ranura.

$W_N$  = contenido de agua para el punto realizado que requirió N golpes para cerrar la ranura

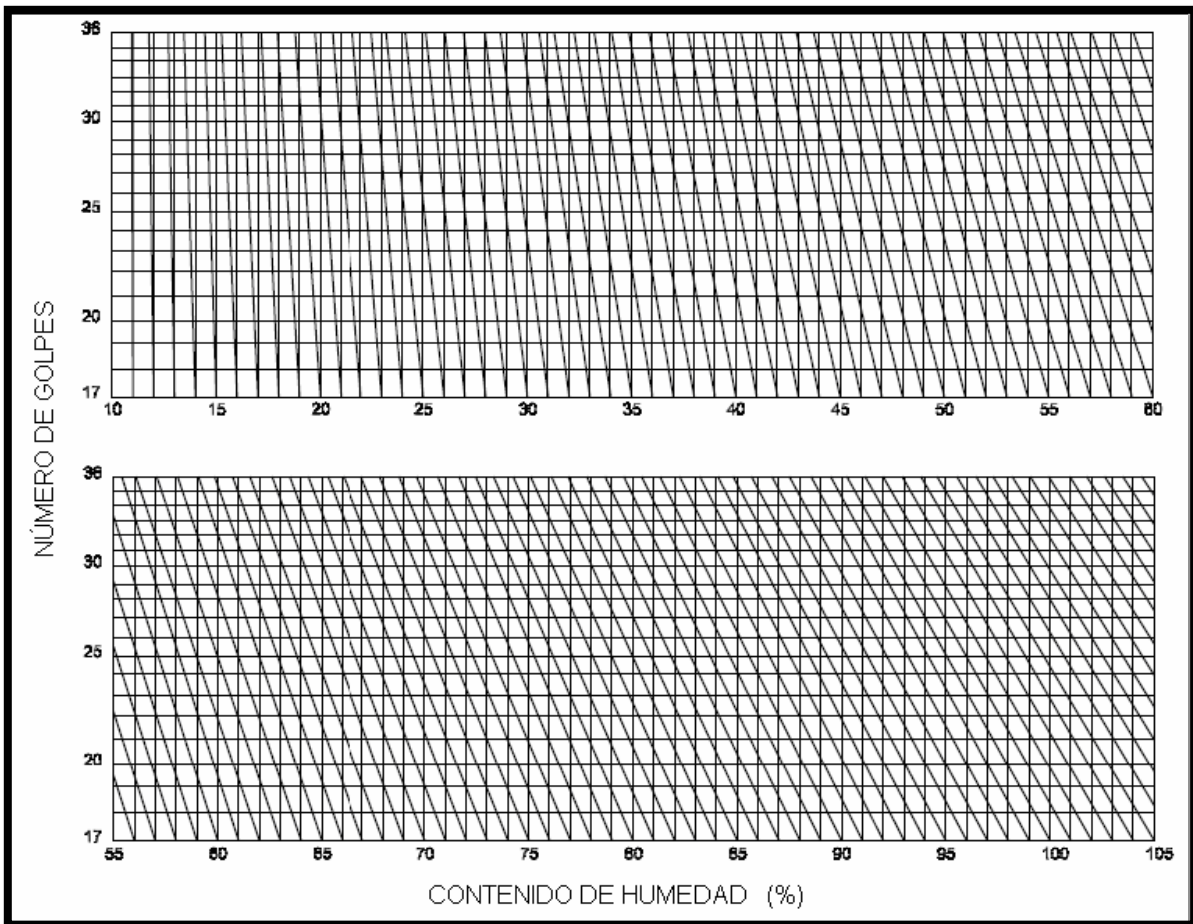
K = factor de corrección Tabla 1

**Tabla 1.** Factores para la Obtención del Límite Líquido a partir de la humedad y del número de golpes que causan el cierre de la ranura

Número de Golpes	Factor para Límite Líquido,
N	K
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014



**Figura 3.** Nomograma desarrollado por la Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, para determinar el límite líquido usando el método de la pendiente media.



**Figura 4.** Diagrama efectuado por la Washington State Highway Department para el cálculo del límite líquido

## ENSAYOS DE COMPROBACIÓN

### 12. METODOS QUE SE PUEDEN USAR

En caso de desacuerdos importantes y donde sea necesario hacer ensayos de comprobación, se usa el Método “A” utilizando el ranurador curvo, anteriormente descrito. Los resultados de los ensayos de Límite Líquido son afectados por:

- El tiempo requerido para hacerlo
- El contenido de humedad con el cual se inicia el ensayo.

- La adición de suelo seco a la muestra preparada.

### **13. PROCEDIMIENTO**

**13.1.** Al hacer la prueba del Límite Líquido para comprobar resultados o cuando la prueba decida alguna controversia , se deberá usar las siguientes programaciones de tiempo:

- Mezcla do de suelo con agua: 5-10 minutos empleándose el periodo más largo para los suelos más plásticos.
- Curado en el humedecedor: 30 minutos.
- Remezclado antes de colocar el material en la cazuela de bronce: Agregar 1 ml de agua y mezclar durante 1 minuto
- Colocación de la cazuela de bronce, ensayo y pesada: 3 minutos.
- Adición de agua y remezcla por 3 minutos.

**13.2.** No se debe reportar ningún ensayo que haya requerido más de 35 o menos de 15 golpes de la cazuela de bronce. En ningún caso se debe agregar material seco a la muestra húmeda en la cazuela para disminuir la humedad o para aumentar la cantidad de muestra.

### **14. PRECISIÓN**

**14.1.** Este planteamiento se aplica a suelos con límite líquido entre 21 y 67.

**14.2.** Repetibilidad (un solo operador) – Dos resultados obtenidos por el mismo operador, con la misma muestra, en el mismo laboratorio y usando los mismos aparatos y en días diferentes deben cuestionarse si los resultados difieren en más de 7% de su promedio.

**14.3.** Reproducibilidad (varios laboratorios) – Dos resultados obtenidos por diferentes operadores, en diferentes laboratorios, deben cuestionarse si ellos difieren de uno a otro en más del 13% de su promedio.

## **15. NORMAS DE REFERENCIA**

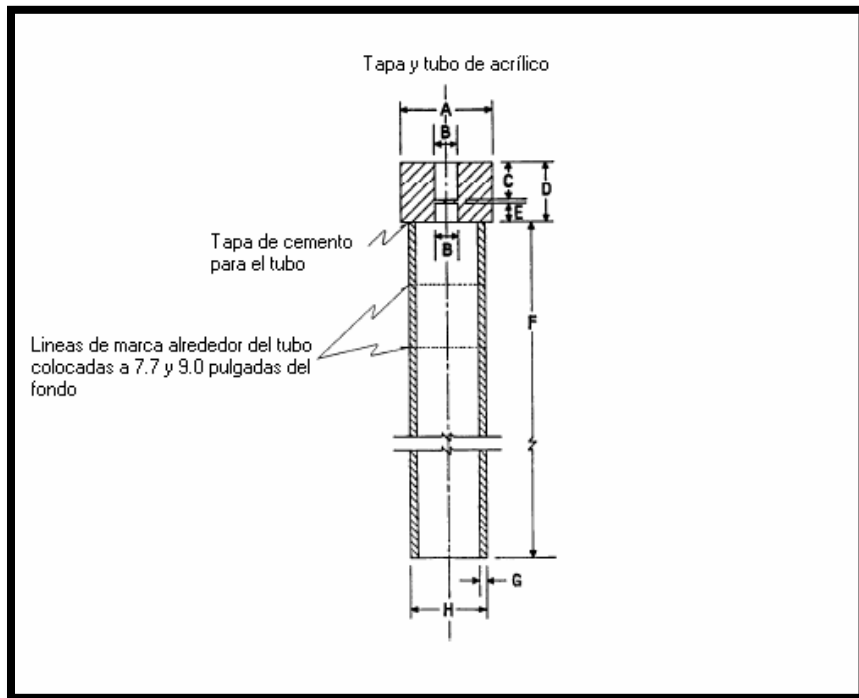
AASHTO T 89-02

ASTM D 4318- 00

### **APÉNDICE: PRUEBA DE RESILIENCIA DE LA BASE DEL EQUIPO DE LÍMITE LÍQUIDO.**

El aparato para medir la resiliencia de la base del equipo de límite líquido se enseña en la Figura 5 y se complementa con la Tabla 2. El aparato consiste en un tubo y su tapa de acrílico transparente, una bola pulida de acero de 8mm de diámetro y una barra pequeña imantada. El cilindro debe estar fijado permanentemente a la tapa o atornillado a ésta como se ve en el dibujo. La bola de acero fijada a la barra pequeña imantada está colocada por dentro de la tapa. Se coloca entonces el cilindro encima de la base que se va a probar. Sosteniendo el tubo hasta tocar ligeramente la base del equipo del límite líquido con una mano, se suelta la bola retirando el imán fuera de la tapa. Se deben usar las medidas de la escala que están en la parte exterior del cilindro para determinar el punto más alto alcanzado por la parte inferior de la bola al rebotar. Se repite la caída de la bola por lo menos 3 veces, colocando el probador en diferente posición para cada caída. El promedio del rebote de la bola de acero expresado como porcentaje del total de la caída, es igual a la resiliencia de la base del equipo.

Las pruebas de resiliencia de la base se deben realizar a temperatura ambiente.



**Figura 5.** Probador de resiliencia

**Tabla 2.** Medidas del probador de resiliencia

Dimensión	Descripción	Medida, mm
A	Diámetro Tapa	38.0
B	Diámetro Perforación	9
C	Profundidad de la perforación	18
D	Altura tapa	25.5
E	Profundidad de la perforación	8.0
F	Longitud del tubo	250.0
G	Espesor de la pared	3.2
H	Diámetro exterior del tubo	31.8

# LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS

I.N.V. E – 126 – 07

## 1. OBJETO

- 1.1. El límite plástico o de un suelo es el contenido más bajo de agua, determinado por este procedimiento, en el cual el suelo permanece en estado plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico. Este índice corresponde a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.
- 1.2. Un valor observado o calculado de un límite de un suelo debe redondearse a la “unidad más cercana”.
- 1.3. El método de moldeado manual de rollos de suelo debe ser dado por el procedimiento normativo indicado en esta norma. Se denomina límite plástico a la humedad más baja con la cual pueden formarse rollos de suelo de unos 3mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichos rollos se desmoronen.

## 2. EQUIPO Y MATERIALES

- 2.1. Espátula – De hoja flexible, de unos 76.2 mm (3") de longitud por 20 mm (3/4") de ancho.
- 2.2. Cápsula para evaporación – De porcelana, o similar, de 115 mm (4 1/2") de diámetro.
- 2.3. Balanza – De 100 g de capacidad con aproximación a 0.01 g.

- 2.4. Aparato de enrollamiento – Para determinar el límite plástico, (opcional). Un aparato acrílico de conformidad con las dimensiones que se muestran en la Figura 1.
- 2.5. Papel para el aparato de enrollamiento – Papel no satinado que no añada materias ajenas (fibras, fragmentos de papel, etc.) al suelo durante el proceso de moldeo de rollos de suelo. Este papel deberá adherirse a las bandejas superior e inferior del aparato, ya sea usando un pegante auto adhesivo.

**Nota 1-** Se debe tener especial cuidado en quitar el adhesivo que quede en el aparato para enrollado después de llevada a cabo la prueba. Pruebas repetidas, sin retirar este pegante, tendrán como resultado de la acumulación de adhesivo, una disminución del diámetro de los rollos del suelo.

- 2.6. Recipientes – Se deben emplear recipientes apropiados, hechos de material resistente a la corrosión y que no estén sujetos a cambios en su masa o a desintegración por repetidos calentamientos y enfriamientos. Los recipientes deben tener tapas que cierren a presión para prevenir pérdidas de humedad de las muestras antes de hacer la determinación inicial de masa y para prevenir la absorción de la humedad de la atmósfera después del secado y antes de la determinación final de la masa. Se requiere un recipiente para cada determinación de humedad.
- 2.7. Horno –Termostáticamente controlado, regulable a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ).
- 2.8. Tamiz – De  $425 \mu\text{m}$  (No.40).
- 2.9. Agua destilada.
- 2.10. Superficie lisa – Para amasado y enrollamiento. Usualmente se utiliza un vidrio grueso esmerilado.

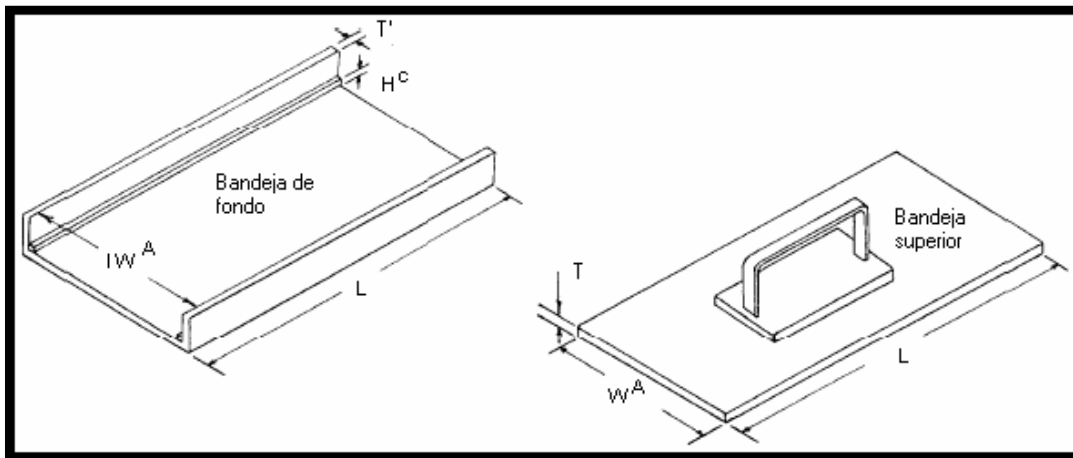
### **3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**

- 3.1.** Si se quiere determinar sólo el límite plástico, se toman aproximadamente 20 g de la muestra que pase por el tamiz de 425  $\mu\text{m}$  (No.40), obtenidos de acuerdo con las normas INV E – 106 o INV E – 107 (Preparación en seco y en húmedo de muestras de suelo para análisis granulométrico y determinación de las constantes físicas). Se amasa con agua destilada hasta que pueda formarse con facilidad una esfera con la masa de suelo. Se toma una porción de unos 6 g de dicha esfera como muestra para el ensayo. El secado previo del material en horno, estufa o al aire, puede cambiar (generalmente disminuir) el límite plástico de un suelo con material orgánico aunque este cambio puede ser poco importante.
- 3.2.** Si se requieren el límite líquido y el límite plástico, se toma una muestra de unos 15 g. de la porción de suelo humedecida y amasada, preparada de acuerdo con la norma INV E – 125 (determinación del límite líquido de los suelos). La muestra debe tomarse en una etapa del proceso de amasado en que se pueda formar fácilmente con ella una esfera, sin que se pegue demasiado a los dedos al aplastarla. Si el ensayo se ejecuta después de realizar el del límite líquido y n dicho intervalo la muestra se ha secado, se debe añadir más agua.

### **4. PROCEDIMIENTO**

- 4.1.** Se secciona una porción de 1.5 a 2.0 g de la masa de suelo tomada de acuerdo con la Sección 3. Con la porción seleccionada, se forma una masa elipsoidal.

- 4.2. Emplear uno de los siguientes métodos para formar los rollos de masa de suelo de 3 mm de diámetro, a razón de 80 a 90 rotaciones por minuto, contando como rotación un movimiento completo de la mano hacia adelante y hacia atrás, regresando así, a la posición inicial.



**Figura 1.** Aparato de enrollamiento para determinar el Límite Plástico

Dimensiones:

$IW =$  aproximadamente 100mm

$L =$  aproximadamente 200mm

$T =$  10 a 15 mm. Véase Nota B

$T' =$  5 mm

$H = 3.20 + 0.25\text{mm}$  más el grueso total del papel sin glaseado, adherido al fondo de la bandeja. Véase Nota C

$W =$  Véase Nota A

**Nota A:** La tolerancia entre el ancho de la bandeja superior ( $W$ ) y el ancho interior ( $IW$ ) debe ser tal, que la bandeja superior pueda deslizarse con facilidad en los rieles sin tambalearse.

**Nota B:** La bandeja superior debe ser lo suficientemente rígida para que el grosor de los rollos de suelo no se vea afectado por la flexibilidad de la bandeja superior.

**Nota C:** El ancho de los rieles de los lados debe estar entre 3 y 6mm.

**4.2.1.** Método de Moldeo de Rollos Manual – Se rueda la masa de suelo entre la palma de la mano o los dedos y el plato de vidrio esmerilado (o un pedazo de papel que esté sobre la superficie horizontal y lisa) con solo la presión necesaria para formar un rollo de diámetro uniforme en toda su longitud. El rollo se debe adelgazar más con cada rotación, hasta que su diámetro alcance 3 mm, tomándose para ello no más de dos minutos. La presión requerida de la mano o de los dedos, variará en gran medida, dependiendo del tipo de suelo. Suelos frágiles de baja plasticidad se enrollan mejor bajo el lado exterior de la palma de la mano o la base exterior del pulgar.

**4.2.2.** Procedimiento Alternativo: Método con aparato de enrollamiento – Se coloca la masa de suelo en la bandeja inferior. Se coloca la bandeja superior en contacto con la masa de suelo. Simultáneamente, se aplica una ligera presión hacia abajo y se mueve la bandeja superior hacia atrás y hacia delante de manera que quede en contacto con los rieles laterales, durante dos minutos. En el transcurso de este proceso de enrollamiento, no se debe permitir que el suelo toque los rieles laterales.

**Nota 2.** En la mayoría de los casos, se puede enrollar simultáneamente más de una masa de suelo en el aparato.

**4.3.** Cuando el diámetro del rollo llegue a 3 mm, se divide en seis u ocho trozos. Se juntan los trozos y se aprietan entre los pulgares y dedos de ambas manos formando una masa uniforme de forma elipsoidal y se enrolla de nuevo. Se repite este procedimiento, partiendo, juntando, amasando y enrollando hasta que el rollo de 3 mm de diámetro se desmorone bajo la presión requerida para el enrollamiento y el suelo no pueda ser rotado para formar el rollo. El desmoronamiento puede ocurrir

cuando el rollo tenga un diámetro mayor de 3 mm. Esto puede considerarse un punto final satisfactorio, siempre y cuando el suelo haya sido previamente enrollado en un rollo de 3mm de diámetro. El desmoronamiento se manifestará de manera diferente con distintos tipos de suelos. Algunos suelos se desbaratan en numerosas agregaciones pequeñas de partículas; otros pueden formar una capa tubular que comienza partiéndose en ambos extremos. El resquebrajamiento continúa hacia el centro y finalmente el suelo se desbarata en muchas y pequeñas partículas lajosas. Suelos muy arcillosos requieren mayor presión para formar el rollo, especialmente cuando se aproximan a l límite plástico, partiéndose finalmente en una serie de segmentos en forma de barriles, cada uno de aproximadamente 6 a 9 mm de longitud. En ningún momento deberá el operador intentar producir el fallo exactamente a los 3 mm de diámetro, al permitir que el rollo alcance los 3 mm y reduciendo entonces la velocidad de enrollamiento o la presión manual, o ambos, y continuar el enrollamiento sin más deformación hasta que el rollo se desbarate. Sin embargo, está permitido reducir la cantidad total de deformación en suelos plásticos débiles, formando el diámetro inicial de la masa de forma elipsoidal más cercano a los 3 mm requeridos de diámetro final.

- 4.4. Se unen las porciones de suelo desmoronado y se colocan en un recipiente previamente pesado. Se tapa el recipiente inmediatamente.
- 4.5. Se repiten las operaciones descritas en las Secciones 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 hasta que el espécimen de 8 g quede completamente ensayado. Se determina el contenido de humedad del suelo en los recipientes de acuerdo con la norma INV E – 122 y se anotan los resultados.

## **5. CÁLCULOS**

Se calcula el Límite Plástico, expresado como el contenido de agua en porcentaje de la masa de suelo seca al horno, de la siguiente manera:

$$L.P = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de suelo seco al horno}} \times 100$$

Se registra el Limite Plástico, aproximado al número entero más cercano.

## 6. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Se puede definir el Índice de Plasticidad (IP) de un suelo como la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico.

$$\text{Índice de Plasticidad} = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico}$$

Cuando el límite líquido o el límite plástico no se puedan determinar, el Índice de Plasticidad se informará con la abreviatura NP (No plástico). Así mismo, cuando el límite plástico resulte igual o mayor que el límite líquido, el índice de plasticidad se informará como NP (No plástico).

## 7. PRECISIÓN

- 7.1. Este planteamiento de precisión se aplica a suelos con un límite plástico que oscila entre 15 y 32, en ensayos realizados utilizando el método de enrollamiento manual.
- 7.2. Repetibilidad (Un solo operador) – Dos resultados obtenidos por el mismo operador, en la misma muestra, en el mismo laboratorio, usando los mismos aparatos, se deben considerar cuestionables si se diferencian en más del 10% de su promedio.
- 7.3. Reproducibilidad (En múltiples laboratorios) – Dos resultados obtenidos por diferentes operadores, en diferentes laboratorios, deben

considerarse cuestionables si ellos difieren entre sí en más de 18% de su promedio.

## **8. INFORME**

El informe deberá incluir, al menos, los siguientes antecedentes:

- 8.1.** Identificación del proyecto.
- 8.2.** Procedencia de la muestra.
- 8.3.** Fecha y lugar de muestreo.
- 8.4.** Fecha de ensayo.
- 8.5.** Valores del Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad.
- 8.6.** Cualquier información adicional respecto al ensayo o al suelo en estudio.
- 8.7.** La referencia a este método.

## **9. NORMAS DE REFERENCIA**

AASHTO T 90-00 (2004)

ASTM D 4318-00

NORMA CHILENA 8102.4

INVIAS	DETERMINACION LIMITE LIQUIDO Y LIMITE PLASTICO	INV E-124 INV E-125
		Fecha: _____

**CERTIFICADO DE ENSAYO No.**

Identificación del contrato: \_\_\_\_\_

Identificación de la muestra: \_\_\_\_\_

Calicata / Sondaje: \_\_\_\_\_ Horizonte: \_\_\_\_\_ Fecha muestreo: \_\_\_\_\_

	LIMITE PLASTICO			LIMITE LIQUIDO				
	1	2	3	1	2	3	4	5
ENSAYE N°								
CÁPSULA N°								
NÚMERO DE GOLPES								
1 PESO CÁPSULA + SUELO HUM. (g)								
2 PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)								
3 PESO DE LA CÁPSULA (g)								
4 PESO DEL AGUA (1-2) (g)								
5 PESO DEL SUELO SECO (2-3) (g)								
6 HUMEDAD (4/5)*100 (%)								
7 PROMEDIO LIMITE PLÁSTICO (%)								

CURVA DE FLUIDEZ

Limite Liquido (LL) %	Limite Plastico (LP) %	Indice de Plasticidad (IP = LL - LP) %
-----------------------	------------------------	--

Muestrado por : \_\_\_\_\_

Ensayador : \_\_\_\_\_

Fecha : \_\_\_\_\_

Vº Bº : \_\_\_\_\_

**Figura 2.** Modelo de formato para resultado

# ANEXO I

**NORMAS DE INVIAS I.N.V. E – 142 – 07**  
**ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO**

**RELACIONES DE HUMEDAD – MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS  
(ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)**

**I.N.V. E – 142 – 07**

**1. OBJETO**

**1.1.** Estos métodos de ensayo se emplean para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria de los suelos compactados en un molde de un tamaño dado con un martillo de 4.54 Kg. (10 lb) que cae desde una altura de 457 mm (18"). Se han previsto cuatro procedimientos alternativos en la siguiente forma:

Método A – Un molde de diámetro 101.6 mm (4"): material de un suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4) (Secciones 3 y 4)

Método B – Un molde de diámetro 152.4 mm (6"): material de suelo que pasa tamiz de 4.75 mm (No.4) (Secciones 5 y 6).

Método C – Un molde de diámetro 101.6 mm (4"): material de suelo que pasa el tamiz de 19.0 mm (3/4") (Secciones 7 y 8)

Método D – Un molde de diámetro 152.4 mm (6") material de suelo que pasa el tamiz de 19.0 mm (3/4") (Secciones 9 y 10).

**1.2.** En las especificaciones se debe indicar el método por usar para el material que se va a ensayar. Si no se especifica ninguno, regirá el Método A.

**1.3.** Este método de ensayo se aplica a mezclas de suelos que tienen el 40% o menos retenido en el tamiz de 4.75mm (No 4) al usar los Métodos A o B, y 30% o menos de retenido en el tamiz de 19mm (3/4") cuando se emplee el Método C o el D. El material retenido en estos tamices deberá ser definido como sobre tamaños (partículas gruesas).

- 1.4. Si el material a ensayarse tiene partículas gruesas en un porcentaje superior al 5% y el resultado es usado para el control de compactación de suelos debe hacer correcciones a la densidad seca máxima de acuerdo con la norma INV E – 228 a fin de comparar la densidad seca del terreno con la densidad seca máxima de compactación correspondiente al material total utilizado en terreno.
- 1.5. Si las tolerancias máximas especificadas de sobre tamaños se exceden, se debe usar otros métodos para el control de compactación.

**Nota 1.** Un método para diseño y control de compactación de tales suelos consiste en usar un relleno de prueba para determinar el grado de compactación requerido y el método para obtener dicha compactación. Empléese luego un método de especificación para controlar la compactación, especificando el tipo y tamaño del equipo de compactación, el espesor de la capa y el número de pasadas.

- 1.6. Los valores establecidos en unidades SI deben ser considerados como norma. Las unidades utilizadas en esta norma para la masa unitaria seca son dadas en Kg./m<sup>3</sup>.
- 1.7. Esta norma no pretende considerar los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien emplee esta norma el establecer prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y el determinar la aplicación de limitaciones regulatorias antes de su empleo.

## **2. EQUIPO**

- 2.1. Moldes – Los moldes deberán ser cilíndricos, de paredes sólidas, fabricados con metal y con las dimensiones y capacidades mostradas más adelante.  
Deberán tener collares ajustable de aproximadamente 60 mm (2.373") de altura, que permitan la preparación de muestras compactadas de

mezclas de suelo con agua con la altura y el volumen deseados. El conjunto de molde y collar deberán estar contruidos de tal manera que se puedan ajustar firmemente a una placa hecha del mismo material (Nota 2).

**Nota 2.** Se pueden emplear otros tipos de moldes similares a los estipulados aquí, pero advirtiendlo que los resultados se deben correlacionar con los de los moldes de pared sólida, obtenidos sobre diferentes tipos de suelo y con los mismos resultados de masa unitaria. Se deberán mantener los registros de dicha correlación y deberá disponerse de ellos para su inspección, cuando se usen tipos de moldes alternativos.

- Un molde de 101.6 mm (4"), con una capacidad de  $0.000943 \pm 0.000008$  m<sup>3</sup> ( $1/30 \pm 0.0003$  pie<sup>3</sup>) con un diámetro interior de  $101.6 \pm 0.41$  mm ( $4.000 \pm 0.016$ ") y una altura de  $116.43 \pm 0.127$  mm ( $4.584 \pm 0.005$ ") (ver Figura 1)
- Un molde de 152.4 mm (6"), con una capacidad de  $0.002124 \pm 0.000021$  m<sup>3</sup> (equivalente a  $1/13.33 \pm 0.00075$  pie<sup>3</sup>), con un diámetro interior de  $152.4 \pm 0.6604$  mm ( $6 \pm 0.026$ ") y una altura de  $116.43 \pm 0.13$  mm ( $4.584 \pm 0.005$ ") (ver Figura 2).
- Moldes que no cumplen con la tolerancia debido al uso. Un molde que no cumpla con las tolerancias de fabricación después de un servicio continuado, puede permanecer en uso siempre y cuando dichas tolerancias no sean excedidas en más del 50 por ciento; y que se emplee para los cálculos, el volumen real del molde, calibrado de acuerdo con la norma para calibración de medidas de masa unitaria para agregados (INV E – 217).

## 2.2. Martillo

- 2.2.1.** De operación manual – Un martillo metálico con una masa de  $4.536 \pm 0.009$  Kg. ( $10.0 \pm 0.02$  lb), que tenga una cara plana circular de

diámetro de  $50.80 \pm 0.25\text{mm}$  ( $2.000 \pm 0.01''$ ). El diámetro real de servicio no podrá ser menor de  $50.42\text{mm}$  ( $1.985''$ ). El martillo deberá estar provisto de una guía apropiada que controle la altura de la caída del golpe desde una altura libre de  $457 \pm 2\text{ mm}$  ( $18.0 \pm 0.06''$ ) por encima de la altura del suelo. La guía deberá tener al menos 4 agujeros de ventilación, de diámetro no menor de  $9.5\text{ mm}$  ( $3/8''$ ), espaciados aproximadamente a  $90^\circ$  ( $1.57\text{ rad}$ ) y  $19\text{ mm}$  ( $3/4''$ ) de cada extremo, y deberá tener suficiente luz libre, para que la caída del martillo y la cabeza no tengan restricciones.

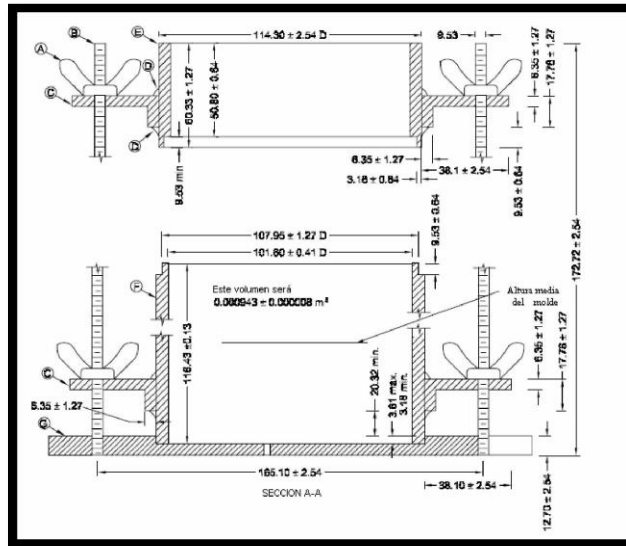
- 2.2.2.** De operación mecánica – Un martillo de metal equipado con un dispositivo para controlar la altura de caída del golpe hasta una altura libre de  $457 \pm 2\text{ mm}$  ( $18.0 \pm 0.06''$ ) por encima del suelo y que distribuya uniformemente los golpes sobre la superficie de éste. El martillo deberá tener una cara plana circular de diámetro de  $50.8 \pm 0.025\text{ mm}$  ( $2.0 \pm 0.01''$ ); el diámetro real de servicio no podrá ser menor de  $50.42\text{mm}$  ( $1.985''$ ) y una masa de fabricación de  $4.536 \pm 0.009\text{ Kg.}$  ( $10.0 \pm 0.02\text{ lb}$ ).

**Nota 3.** El martillo mecánico se deberá calibrar con varios tipos de suelos y ajustar su peso, si fuere necesario, para que dé los mismos resultados de humedad-masa unitaria que los obtenidos con martillos de operación manual.

Puede ser impráctico ajustar el aparato mecánico de tal manera que la caída libre sea de  $457\text{ mm}$  ( $18''$ ) cada vez que caiga el martillo, como con el martillo operado manualmente. Para efectuar el ajuste de la caída libre, la porción del material suelto que recibe el golpe inicial deberá comprimirse levemente con el martillo para establecer el punto de impacto a partir del cual se determina la caída de  $457\text{ mm}$  ( $18''$ ). Los golpes subsiguientes sobre la capa de suelo que está siendo compactada se pueden aplicar dejando caer el martillo desde una altura de  $457$

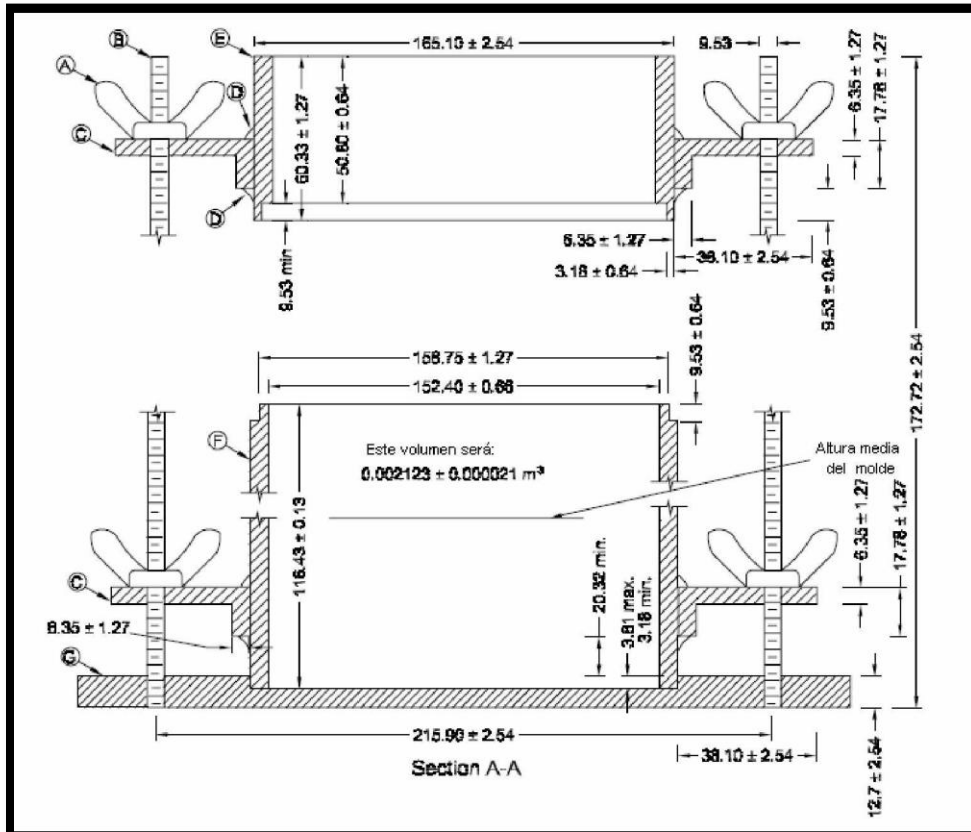
mm (18") por encima de la altura inicial de asentamiento o, cuando el aparato mecánico está diseñado con un ajuste de altura para cada golpe, todos los golpes subsiguientes deberán tener una caída libre para el martillo de 457 mm (18"), medidos a partir de la altura del suelo como quedó compactado mediante el golpe previo.

- 2.2.3.** Cara del martillo – Deberá ser circular, aunque se acepta como alternativa un martillo con cara de sector circular. En el informe se deberá indicar si se emplea un tipo de cara usada diferente de la circular de 50.8 mm (2"), de diámetro, pero la utilizada deberá tener un área igual al de la cara circular.
- 2.3.** Dispositivo para extrusión de las muestras – Un gato, un extractor u otro dispositivo adecuado que permita sacar por extrusión las muestras del molde.
- 2.4.** Balanzas – Una de 11.5 Kg. de capacidad y 5 g de sensibilidad, cuando se usan para pesar moldes de 152.4 mm (6") con suelos húmedos compactados; cuando se usa el molde de 101.6 mm (4"), puede emplearse una balanza de menor capacidad si la sensibilidad y aproximación es de 5 g. También se requiere otra balanza de 1kg de capacidad con sensibilidad de 0.1 g.
- 2.5.** Horno – Termostáticamente controlado, capaz de mantener una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 + 9^{\circ}\text{F}$ ) para el secado de las muestras.
- 2.6.** Regla metálica – De acero endurecido, de borde recto, al menos de 250 mm (10") de largo. Deberá tener un borde biselado y al menos una cara plana en sentido longitudinal (usada para el corte final del suelo).



Dimensiones en mm

**Figura 1.** Molde cilíndrico de 101.6 mm (4.0") para ensayos de suelos



Dimensiones en mm

**Figura 2.** Molde cilíndrico de 152.4 mm (6.0") para ensayos de suelos

El borde biselado se deberá usar para el alisamiento final, si éste es recto dentro de una tolerancia de 0.1 % de la longitud; sin embargo, con el uso continuado, el borde cortante se puede desgastar excesivamente, en cuyo caso no sería adecuado para enrasar el suelo hasta el nivel del molde. La regla no deberá ser tan flexible que cuando se enrase el suelo con el borde cortante, proporcione una superficie cóncava en la superficie de la muestra.

- 2.7.** Tamices – De 50, 19.0 y 4.75 mm (2", 3/4" y No.4).
- 2.8.** Herramientas misceláneas – Tales como cazuelas para mezclado, espátulas, etc., o un dispositivo mecánico adecuado para mezclar las muestras de suelo con diversas cantidades de agua.
- 2.9.** Recipientes – Para determinar la humedad de las muestras, elaborados en metal u otro material adecuado, con cierres que ajusten herméticamente para evitar la pérdida de humedad durante el pesaje.

## **METODO A**

### **3. MUESTRA**

- 3.1.** Si la muestra de suelo está húmeda cuando se recibe del terreno, se deberá secar hasta que llegue a hacerse friable bajo la acción de una espátula. El secamiento se puede efectuar al aire o por medio de aparatos de secado de manera que la temperatura de la muestra no pase de 60°C (140°F). Rómpanse entonces los terrones de una manera tal, que no se reduzca el tamaño natural de las partículas individuales de la muestra.
- 3.2.** Se tamiza una cantidad adecuada de suelo pulverizado representativo sobre el tamiz de 4.75 mm (No.4). Si lo hubiere, se descarta el material grueso retenido sobre dicho tamiz.

- 3.3.** Se escoge una muestra representativa del suelo preparado como se ha descrito en las Secciones 3.1 y 3.2, con una masa aproximada de 3 Kg. (7 lb) ó más.

**Nota 4.** Al desarrollar una curva de compactación para suelos de libre drenaje, tales como gravas y arenas uniformes en los cuales el drenaje ocurre por el fondo del molde y la placa de base, es preferible tomar una muestra representativa para hallar el contenido de humedad del recipiente de mezclado, con el fin de determinar la humedad disponible para la compactación.

#### **4. PROCEDIMIENTO**

- 4.1.** Se mezcla perfectamente la muestra representativa escogida con agua suficiente para humedecerla, aproximadamente, hasta un 4 por ciento por debajo del contenido óptimo de humedad.
- 4.2.** Se prepara un espécimen compactando el suelo humedecido en el molde de 101.6 mm (4") de diámetro (con el collar ajustado) en cinco capas aproximadamente iguales y que den una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5"). Se compacta cada capa mediante 25 golpes uniformemente distribuidos con el martillo con una caída libre de 457 mm (18") por encima de la altura aproximada del suelo compactado cuando se usa un martillo operado manualmente o desde 457 mm (18") sobre la elevación aproximada del suelo compactado cuando se emplee el martillo operado mecánicamente. Durante la compactación, el molde deberá permanecer firme sobre un soporte denso, uniforme, rígido y estable.

**Nota 5.** Bases satisfactorias para colocar el molde durante la compactación del suelo pueden ser: un bloque de concreto, que pese no menos de 90 Kg. (200 lb.), sostenido por una fundación relativamente estable; un piso sano de concreto; y, en

el caso de hacer el ensayo en el campo, superficies como las que proporcionen las alcantarillas de cajón de concreto (boxculverts), los puentes y los pavimentos.

- 4.3.** Después de la compactación, se remueve el collar de extensión, se recorta cuidadosamente el suelo compactado que sobresalga en la parte superior del molde usando la regla metálica. Se pesa el molde con el suelo húmedo, en kilogramos, con aproximación de 5 g (en libras con aproximación de 0.01 lb.).

Para moldes que cumplan con las tolerancias dadas en la Sección 2.1 y cuyos pesos se hayan anotado en Kg., se multiplica la masa del suelo compactado y del molde, menos la masa del molde, por 1060.44 ( $1/0.000943 \text{ m}^3$ ), y se anota el resultado como la masa unitaria húmeda, en Kg/m<sup>3</sup>, del suelo compactado. Cuando se usen moldes que no cumplen con la tolerancia de menos del 50 %, el cálculo se debe efectuar teniendo en cuenta el volumen calibrado del molde.

- 4.4.** Se saca la muestra compactada del molde y se corta verticalmente a través de su centro. Se toma una muestra representativa acorde con la norma INV E-122 del material de una de las caras del corte; se pesa inmediatamente y se seca en un horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230^\circ \pm 9^\circ\text{F}$ ) por un tiempo mínimo de 12 horas o hasta masa constante, para determinar el contenido de agua. La muestra para humedad no deberá tener una masa menor de 300 g.
- 4.5.** Se rompe completamente la porción restante de la muestra moldeada hasta cuando se considere a ojo que pase por el tamiz de 4.75 mm (No.4), y se reúne con la porción restante de la muestra que se está ensayando. Se agrega agua en cantidad suficiente para aumentar la humedad del suelo 1 ó 2 puntos de porcentaje, y se repite el procedimiento anterior para cada incremento de agua. Esta serie de determinaciones se debe continuar hasta que disminuya o no haya

cambio en la masa unitaria húmeda,  $h_d$ , en Kg./m<sup>3</sup>, del suelo compactado. (Nota 6)

**Nota 6.** Este procedimiento se ha encontrado satisfactorio en la mayoría de los casos. Sin embargo, en algunos casos, en los cuales el suelo es de carácter frágil y se reduce significativamente el tamaño de sus granos, debido a la compactación repetida y en casos en los cuales el suelo está constituido por un material arcilloso de textura grasosa, dentro del cual es difícil incorporar agua, se deberá emplear una muestra diferente del mismo material para cada punto del ensayo de compactación. En estos casos, las diferentes muestras deberán mezclarse perfectamente con cantidades suficientes de agua para que la humedad de las mismas varíe aproximadamente en 2 puntos de porcentaje. Los puntos de humedad escogidos deberán encerrar el valor del contenido óptimo de humedad, proporcionando de esta manera muestras que, cuando se compactan, aumentan su masa hasta la masa unitaria máxima deseada y disminuyen luego de alcanzada ésta. Las muestras de las mezclas de suelo con agua se deberán colocar en recipientes cubiertos y deberán permanecer en reposo por lo menos 12 horas antes de efectuar la determinación del ensayo de humedad-peso unitario.

## **METODO B**

### **5. MUESTRA**

Se escoge la muestra representativa de acuerdo con la Sección 3.3 excepto que deberá tener una masa aproximada de 7 Kg. (16lb).

### **6. PROCEDIMIENTO**

Se sigue el mismo procedimiento descrito para el Método A en la Sección 4, excepto en lo siguiente:

Se prepara una muestra compactando el suelo humedecido en el molde de 152.4 mm (6"), de diámetro (con el collar ajustado), en cinco capas aproximadamente

iguales, de tal manera que proporcionen una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5"), siendo compactada cada capa por medio de 56 golpes del martillo, uniformemente distribuidos.

Para moldes que cumplen con las tolerancias citadas en la Sección 2.1 y con las masas registradas en kilogramos, la masa de la muestra compactada y el molde, menos la masa del molde se multiplica por 470.80 (1/0.002124), y se anota el resultado como la masa unitaria húmeda,  $d_{h1}$ , en Kg./m<sup>3</sup>, del suelo compactado. Para moldes usados fuera de la tolerancia del 50 %, el cálculo se debe hacer teniendo en cuenta el volumen calibrado del molde.

## **METODO C**

### **7. MUESTRA**

**7.1.** Si la muestra de suelo está húmeda cuando se recibe del terreno, se deberá secar hasta que llegue a hacerse friable bajo la acción de una espátula. El secamiento se puede efectuar al aire o por medio de aparatos de secado de manera que la temperatura de la muestra no pase de 60°C (140°F). Rómpanse entonces los terrones de una manera tal, que no se reduzca el tamaño natural de las partículas individuales de la muestra.

**7.2.** Se tamiza una cantidad representativa de suelo pulverizado sobre el tamiz de 19.0 mm (3/4"). Se descarta el material grueso retenido sobre dicho tamiz, si lo hubiere.

Cuando fuere aconsejable mantener en la muestra el mismo porcentaje de agregado grueso que pasa por el tamiz de 50 mm (2") y queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (No.4), para el ensayo humedad-masa unitaria, que en la muestra original de campo, el material retenido sobre el tamiz 19.0 mm (3/4") deberá ser reemplazado en la forma siguiente: se tamiza una cantidad adecuada de suelo pulverizado sobre los

tamices de 50 mm (2") y 19.0 mm (3/4"). Se pesa el material que pasa tamiz de 50 mm (2") y que queda retenido en el tamiz de 19.0 mm (3/4") y se reemplaza con un peso igual que pase dicho tamiz y que quede retenido en el de 4.75 mm (No.4). Se toma el material para sustitución, de la porción sobrante de la muestra.

- 7.3.** Se selecciona una muestra representativa, que tenga un peso de 5 Kg. (11lb) ó más de suelo preparado como se describió en las Secciones 7.1 y 7.2.

## **8. PROCEDIMIENTO**

- 8.1.** Se mezcla perfectamente la muestra representativa escogida con agua suficiente para humedecerla hasta, aproximadamente, 4 por ciento por debajo del contenido óptimo de humedad.
- 8.2.** Se prepara un espécimen compactando el suelo humedecido en el molde de 101.6 mm (4") de diámetro (con el collar ajustado) en cinco capas aproximadamente iguales y que den una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5"). Se compacta cada capa mediante 25 golpes uniformemente distribuidos con el martillo con una caída libre de 457 mm (18") por encima de la altura aproximada del suelo compactado cuando se usa un martillo operado manualmente o desde 457 mm (18") sobre la elevación aproximada del suelo compactado cuando se emplee el martillo operado mecánicamente. Durante la compactación, el molde deberá permanecer firme sobre un soporte denso, uniforme, rígido y estable. (Ver Sección 4.2)
- 8.3.** Después de la compactación, se remueve el collar de extensión y se recorta cuidadosamente el suelo compactado que sobresalga en la parte superior del molde mediante la regla metálica con borde recto. Los huecos que se hayan desarrollado en la superficie por la remoción de material grueso deberán ser rellenados con material de tamaño más

pequeño. Se pesa el molde y el suelo húmedo en kg. con aproximación de 5g. Para moldes que cumplan con las tolerancias dadas en la Sección 2.1 y cuyos pesos se hayan anotado en Kg., se multiplica la masa del suelo compactado y del molde, menos la masa del molde, por 1060.44 (1/0.000943 m<sup>3</sup>), y se anota el resultado como la masa unitaria húmeda,  $d_h$ , en Kg./ m<sup>3</sup>, del suelo compactado. Cuando se usen moldes que no cumplen con la tolerancia de menos del 50 %, el cálculo se debe efectuar teniendo en cuenta el volumen calibrado del molde.

- 8.4.** Se saca la muestra compactada del molde y se corta verticalmente a través de su centro. Se toma una muestra representativa acorde con la norma INV E – 122 del material de una de las caras del corte; se pesa inmediatamente y se seca en un horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230^\circ \pm 9^\circ\text{F}$ ) por un tiempo mínimo de 12 horas o hasta masa constante, para determinar el contenido de agua. La muestra para humedad no deberá tener una masa menor de 500 g.
- 8.5.** Se rompe completamente la cantidad restante del material hasta cuando pase el tamiz de 19.0 mm (3/4") y se considera a ojo, que el noventa (90 %) de los terrones de suelo pasan por el tamiz de 4.75 mm (No.4), y se agrega a la parte restante de la muestra que se va a ensayar. A continuación, se añade agua en cantidad suficiente para aumentar la humedad de la muestra en uno o dos puntos de porcentaje, y se repite el procedimiento anterior para cada incremento de agua. Se prosigue con esta serie de determinaciones hasta cuando disminuya o no cambie la masa unitaria húmeda  $d_h$ , en kg/m<sup>3</sup> del suelo compactado (ver Sección 4.5).

## METODO D

### 9. MUESTRA

Se escoge la muestra representativa de acuerdo con la Sección 7.3, excepto que ésta deberá tener una masa de aproximadamente 11 Kg. (25lb).

### 10. PROCEDIMIENTO

Se sigue el mismo procedimiento descrito para el Método C en la Sección 8, excepto en lo siguiente: se forma una muestra compactando el suelo humedecido en el molde de 152.4 mm (6") de diámetro (con el collar ajustado) en cinco capas aproximadamente iguales, que den una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5"), compactándose cada capa mediante 56 golpes del martillo, distribuidos uniformemente. Para moldes que cumplan con las tolerancias dadas en la Sección 2.1 y con las masas registradas en kilogramos, la masa de la muestra compactada y del molde menos la masa del molde se multiplican por 471 (1/0.002124m<sup>3</sup>), y se registra el resultado como la masa unitaria húmeda, del suelo compactado d h<sub>1</sub>, en Kg./m<sup>3</sup>. Cuando se usen moldes fuera de la tolerancia del 50 %, se hace el cálculo teniendo en cuenta el volumen calibrado del molde.

## CÁLCULOS E INFORME

### 11. CÁLCULOS

Se calcula la humedad y la masa unitaria seca del suelo compactado para cada muestra, así:

$$w = \frac{A - B}{B - C} \times 100$$
$$\delta_d = \frac{\delta_h}{w + 100} \times 100$$

donde:

w = Porcentaje de humedad en la muestra con base en la masa seca del suelo en el horno.

A = Masa del recipiente y del suelo húmedo.

B = Masa del recipiente y del suelo seco.

C = Masa del recipiente.

$\delta d$  = Masa unitaria seca, en Kg./m<sup>3</sup>

$\delta h$  = Masa unitaria húmeda, en Kg./m<sup>3</sup>

## **12. RELACIONES DE HUMEDAD-MASA UNITARIA SECA**

- 12.1.** Los cálculos de la Sección 11.1 se deberán efectuar para determinar la humedad y la correspondiente masa unitaria seca de las muestras de suelo compactadas en Kg./m<sup>3</sup> (lb/pie<sup>3</sup>). Las masas unitarias secas se dibujan como ordenadas y las humedades correspondientes como abscisas.
- 12.2.** Humedad óptima – Cuando la masa unitaria y las correspondientes humedades para el suelo han sido determinadas y dibujadas para conformar una curva, el contenido de humedad que corresponda al pico de la curva, se llamará “humedad óptima” del suelo bajo la compactación mencionada atrás.
- 12.3.** Masa unitaria seca máxima – La masa unitaria del suelo secado al horno en Kg./m<sup>3</sup>, correspondiente al contenido óptimo de humedad, bajo la compactación mencionada arriba, se llamará “masa unitario seca máxima”.

## **13. INFORME**

El informe debe incluir:

- 13.1.** El método empleado (A, B, C ó D).

- 13.2. La humedad óptima, como porcentaje, aproximada al entero más próximo.
- 13.3. La masa unitaria máxima en Kg./m<sup>3</sup>, con aproximación a 0.5 Kg./m<sup>3</sup> o en lb/pie<sup>3</sup> con aproximación al entero más próximo.
- 13.4. En los métodos C y D se debe indicar el material retenido en el tamiz de 19.0 mm (3/4") que fue removido y reemplazado.
- 13.5. El tipo de cara del martillo, si se usó una diferente a la circular de 50.8 mm (2") de diámetro.

#### **14. PRECISIÓN**

- 14.1. Repetibilidad de un solo operador – Dos resultados obtenidos por el mismo operador sobre la misma muestra, en el mismo laboratorio, empleando el mismo aparato, y en días diferentes, se deberá considerar dudoso si difieren en más del 10 % en su contenido medio óptimo de humedad y en 35 kg/m<sup>3</sup> (2.2 lb/pie<sup>3</sup>), en la masa unitaria máxima.
- 14.2. Reproducibilidad multilaboratorio – Dos resultados obtenidos por operadores diferentes en diferentes laboratorios deberán considerarse dudosos si difieren en más del 15 % de su valor medio para el contenido óptimo de humedad y en 72 Kg./m<sup>3</sup> (4.5 lb/pie<sup>3</sup>), para la masa unitaria máxima.

#### **15. NORMAS DE REFERENCIA**

AASHTO T 180– 01

ASTM D 1557 – 00

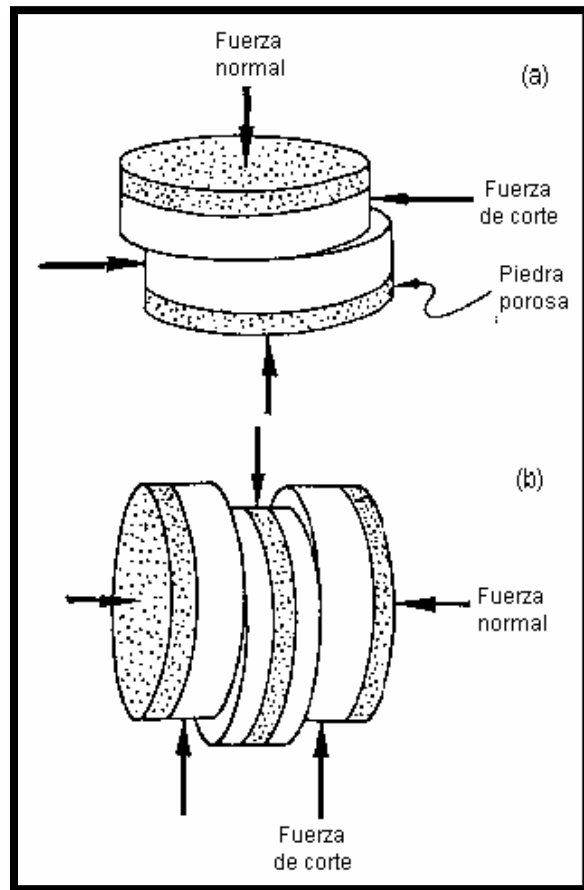
# ANEXO J

**NORMAS DE INVIAS I.N.V. E – 154 – 07**  
**ENSAYO DE CORTE DIRECTO**

**DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE**  
**MÉTODO DE CORTE DIRECTO (CD) (CONSOLIDADO DRENADO)**  
**I.N.V. E – 154 – 07**

**1. OBJETO**

1.1. Esta norma tiene por objeto establecer el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo. El ensayo se podrá hacer con un corte sencillo o un corte doble como se ilustra en la Figura 1. Este ensayo se puede realizar sobre todos los tipos de suelos, ya sean muestras inalteradas o remoldeadas.



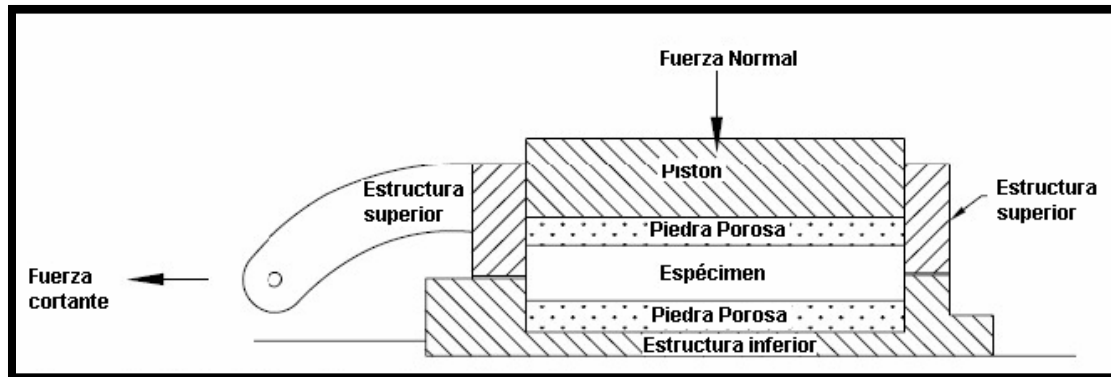
**Figura 1 . Esquema del ensayo del corte (a) sencillo y (b) del corte doble**

- 1.2. Los resultados del ensayo son aplicables en situaciones de campo, en las cuales ha ocurrido la consolidación completa bajo la sobrecarga existente y se produce lentamente la falla, así que el exceso de las presiones de poros se disipa. El ensayo también es útil para la determinación en el material de la máxima resistencia al corte y de la resistencia residual a lo largo de planos conocidos de baja resistencia.
- 1.3. El resultado del ensayo puede ser afectado por presencia de partículas de roca en la superficie de falla que es inducida.
- 1.4. El ensayo no es apropiado para obtener relaciones exactas de esfuerzo-deformación (en la muestra de ensayo), debido a la distribución no uniforme de los esfuerzos de corte y de las deformaciones. El desplazamiento a velocidad lenta permitirá disipar el exceso de las presiones de poros y permitirá también el flujo plástico de los suelos cohesivos blandos. Se debe tener cuidado para que las condiciones del ensayo sean representativas de aquellas que se están investigando.
- 1.5. Los valores se deben expresar en unidades SI.
- 1.6. Esta norma no considera los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien la emplee establecer prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y determinar la aplicación de limitaciones regulatorias antes de su empleo.

## **2. RESUMEN DEL MÉTODO**

El ensayo consiste en: (a) Colocación de la muestra de ensayo en el dispositivo de corte directo; (b) Aplicación de una carga normal determinada ; (c) Disposición de los medios de drenaje y humedecimiento de la muestra; (d) Consolidación de la

muestra bajo la carga normal; (e) Liberación de los marcos que sostienen la muestra; (f) Aplicación de la fuerza de corte para hacer fallar la muestra (véanse Figuras 1 y 2). Generalmente tres o más muestras son ensayadas, cada una bajo fuerza normal diferente, para determinar los efectos sobre la resistencia al corte y las deformaciones. El intervalo de las cargas normales usadas deberá ser el apropiado y en concordancia para las condiciones del suelo investigado.



**Figura 2.** Dispositivo para el ensayo del corte directo

### 3. EQUIPO

**3.1.** Aparato o Dispositivo de corte directo – El dispositivo de corte directo deberá sostener la probeta con seguridad entre dos piedras porosas colocadas una en cada cara, de tal manera que no se presenten movimientos de torsión sobre ella. Debe estar provisto de los dispositivos necesarios para aplicar una fuerza normal en las caras de la muestra, para determinar los cambios en el espesor de la muestra, para permitir el drenaje del agua a través de las piedras porosas insertadas en el fondo y parte superior de la muestra y para sumergir la muestra en agua. El equipo debe ser capaz de aplicar y medir una fuerza de corte para hacer fallar la muestra a lo largo de un determinado plano (corte simple) o de determinados planos (corte doble), los cuales serán paralelos a las caras de la muestra y determinar los desplazamientos laterales de ésta. Los marcos que sostienen la probeta deben ser lo

suficientemente rígidos para evitar su deformación durante el corte. Las diferentes partes del dispositivo deben ser de un material resistente a la corrosión por sustancias contenidas en el suelo o por la humedad del mismo.

- 3.2.** Caja de corte – La caja de corte podrá ser redonda o cuadrada, deberá ser de acero inoxidable, bronce, o aluminio, con los aditamentos necesarios para el drenaje por la parte de arriba y por el fondo. La caja de corte deberá estar dividida por un plano horizontal que separa dos mitades de igual espesor, ésta deberá estar provista con tornillos de alineación o bloqueo. Adicionalmente la caja de corte también deberá poseer tornillos que controlen el espaciamiento entre el marco superior y el inferior.
  
- 3.3.** Piedras porosas – Las piedras porosas deben ser de carburo de silicio, óxido de aluminio o de un metal que no sea susceptible a la corrosión por sustancias contenidas en el suelo o la humedad del mismo. La permeabilidad de la piedra porosa debe ser substancialmente mayor que el de la muestra, pero debe prevenir la intrusión excesiva de las partículas de muestra en los poros de la inserción. El diámetro de la piedra porosa en la parte superior de la muestra será de 0.2 mm a 0.5 mm menor del diámetro dentro del anillo. La piedra porosa también deberá ayudar a transferir el esfuerzo de corte a la muestra, por lo cual deberá ser lo suficientemente tosca para desarrollar un enclavamiento. El lavado con arena a presión o labrado con herramienta podrá preparar la superficie de la piedra porosa, pero la superficie de la inserción no debe ser demasiado irregular por que causaría concentraciones de esfuerzos en la muestra.

**Nota 1.** No se tiene establecido un criterio estricto para textura y permeabilidad de las piedras porosas . Como referencia se puede establecer, que para muestras de suelos normales, la permeabilidad que se puede adoptar para las piedras porosas será de aproximadamente igual a  $5.0 \times 10^{-4}$  a  $1.0 \times 10^{-3}$  cm/s cuando se ensayen limos y arcillas y se podrá trabajar con piedras porosas con permeabilidad aproximadamente igual a 0.05 a 0.10 cm/s para cuando se ensayen arenas. Es importante que la permeabilidad de la piedra porosa no se reduzca por la acumulación de partículas de las muestras en los poros; la comprobación frecuente de esta característica y la limpieza, hirviéndolas o por métodos ultrasónicos, se requerirán periódicamente.

#### **3.4.** Dispositivos de carga:

**3.4.1.** Dispositivo para la aplicación de la fuerza normal – Debe estar capacitado para aplicar rápidamente la fuerza especificada sin excederla y para mantenerla con una variación máxima de  $\pm 1 \%$  durante el proceso de ensayo.

**3.4.2.** Dispositivo para la aplicación de la fuerza de corte – La capacidad depende más que todo del tipo de control: con control de deformaciones o con control de esfuerzos. Se prefiere, generalmente, el primero por la facilidad para determinar tanto el esfuerzo último como la carga máxima. El equipo con control de deformaciones debe tener la capacidad para cortar la muestra a una velocidad de desplazamiento uniforme, con una desviación de  $\pm 5 \%$  y debe permitir el ajuste de la velocidad de desplazamiento dentro de un rango que permita ajuste de la rata de desplazamiento de 0.0025 a 1.0 mm/min. La velocidad de aplicación de la carga, depende de las características de consolidación del suelo (ver Sección 6.8). Se logra usualmente por medio de un motor con caja de transmisión y la

fuerza de corte se determina por medio de un indicador de carga , anillo calibrado o celda de carga.

- 3.4.3.** El peso del marco de corte superior, en el caso que éste se apoye en el momento del corte sobre la muestra, deberá ser menor al 1% del valor de la fuerza normal aplicada, en el caso que no sea así se deberá tener en cuenta como parte de la fuerza normal aplicada o modificar este marco.

**Nota 2.** El corte de la muestra de prueba a velocidad mayor que la especificada, puede producir resultados de corte parcialmente drenados que diferirán de los esfuerzos drenados en el material.

- 3.5.** Dispositivos para medir fuerza de corte – Deberá poseer un medidor de fuerza de corte, el cual podrá ser un anillo calibrado o una celda de carga que tendrá precisión de 2.5 N (0.5 lbf) o al menos el 1% de la carga lateral de falla, cualquiera que sea más grande.
- 3.6.** Recipiente para caja de corte – Caja metálica que soporte la caja de corte y produzca , bien sea , una reacción contra la mitad de la caja de corte que esta frenada o una base sólida con las guías para encuadrar la mitad de la caja de corte que está libre de movimiento cuando la fuerza horizontal de corte es aplicada.
- 3.7.** Cuarto húmedo – Tal que garantice que la pérdida de humedad durante la preparación de la muestra no exceda de 0.5 %, tanto para su almacenamiento como para su preparación.
- 3.8.** Anillos para el tallado de la muestra – Deberán ser los adecuados para tallar la muestra de acuerdo con las dimensiones interiores de la caja de

corte con un mínimo de alteración. Se puede necesitar un soporte exterior, para mantener en alineamiento axial, una serie de 2 o 3 anillos.

- 3.9.** Balanza – Debe tener una sensibilidad de 0.1 g o 0.1 % de la masa de la probeta.
- 3.10.** Medidores de desplazamiento – Deben ser adecuados para medir los cambios en el espesor de la muestra con una sensibilidad de 0.002 mm (0.0001") y para medir los desplazamientos laterales con una sensibilidad de 0.02 mm (0.001").
- 3.11.** Horno de secado – Capaz de mantener la temperatura a  $110^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$  ( $230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{F}$ ).
- 3.12.** Recipientes varios – Para muestras de humedad, los cuales no deberán ser susceptibles a la corrosión ni al cambio de masa, ni a la desintegración por enfriamiento o calentamiento.
- 3.13.** Equipo para el remoldeo o compactación de probetas – Será el adecuado para cada tipo de suelo y en concordancia con el objetivo investigado en el ensayo.
- 3.14.** Equipo misceláneo – Incluyen cronómetro, sierra de alambre, espátula, cuchillos, enrasadores, agua destilada y demás elementos necesarios para la correcta ejecución del ensayo.

#### **4. PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES**

- 4.1.** Si se usa una muestra inalterada, debe ser suficientemente grande para proveer un mínimo de tres probetas de ensayo idénticas y deberán ser

tomadas de acuerdo a los procedimientos descritos en la norma INV E – 103 para los grupos C y D.

- 4.2. La preparación de la muestra se debe efectuar de tal manera que la pérdida de humedad sea insignificante.
- 4.3. La muestra se talla sobre medida para las dimensiones del dispositivo de corte directo.
- 4.4. Para muestras inalteradas de suelos sensibles, se debe tener extremo cuidado al labrar las muestras, para evitar la alteración de su estructura natural.
- 4.5. Se determina la masa inicial de la muestra para el cálculo posterior del contenido inicial de humedad de acuerdo con la norma INV E – 122.
- 4.6. Si se utilizan muestras de suelos compactados, la compactación se deberá hacer con las condiciones de humedad y densidad deseadas. Se puede efectuar directamente en el dispositivo de corte, en un molde de dimensiones iguales a las del dispositivo de corte o en un molde mayor para recortarlas de acuerdo con la Sección 4.3.
- 4.7. El diámetro mínimo de las muestras circulares o el ancho mínimo para muestras rectangulares debe ser alrededor de 50 mm (2"), pero no menor de diez veces el tamaño máximo de las partículas del suelo.

**Nota 3.** Para minimizar las alteraciones causadas por el muestreo, el diámetro de las muestras para el ensayo, obtenidas de tubos muestreadores, debe ser por lo menos 6 mm (1/4") menor que el diámetro del tubo.

- 4.8. El espesor mínimo de la muestra de ensayo, debe ser alrededor de 13 mm (1/2"), pero no menor de seis veces el tamaño máximo de las partículas del suelo.
- 4.9. La relación mínima diámetro/espesor o ancho/espesor, según la forma geométrica de la muestra, debe ser 2:1.

## 5. CALIBRACIÓN

- 5.1. Se ensambla el dispositivo de corte directo (sencillo) con un disco metálico de calibración, de espesor igual al de la muestra de ensayo deseada y alrededor de 5 mm (1/4") menor en diámetro.

**Nota 4.** El dispositivo de corte doble, requiere dos discos de calibración.

- 5.2. Se coloca el indicador de desplazamiento normal en su posición habitual, se ajusta este indicador de tal manera que se pueda usar para medir tanto lecturas de consolidación como de expansión, para luego aplicar fuerzas normales iguales a las cargas que se van a utilizar en el ensayo.
- 5.3. Se registra la lectura del indicador de deformación normal, como una futura referencia para determinar, tanto el espesor de la muestra de ensayo, como la deformación desarrollada por el conjunto.
- 5.4. Adicionalmente se registra la lectura del indicador de deformación normal, en el proceso de descarga del disco de calibración, como una futura referencia para determinar, tanto el espesor de la muestra de ensayo, como la deformación desarrollada por el conjunto.

**5.5.** Luego, se retira el disco de calibración.

**Nota 5.** Se puede aceptar cualquier otro método que permita la calibración exacta del aparato.

## **6. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO**

**6.1.** Se ensambla la caja de corte con los marcos alineados y se bloquea para no permitir efectos de corte prematuros en la muestra. Se aplica una ligera capa de grasa entre los marcos para lograr impermeabilidad durante la consolidación y reducir la fricción durante el corte. También se pueden usar espaciadores o superficies recubiertas con teflón, para reducir la fricción durante el corte. Se introduce la muestra de ensayo con sumo cuidado. Se conectan los dispositivos de carga y se ajustan los medidores de desplazamiento o lateral de corte, como los de cambio del espesor de la muestra, luego se determinará el espesor inicial de la probeta.

**Nota 6.** La decisión de humedecer las piedras porosas antes de la colocación y aplicación de la fuerza normal sobre las muestras, dependerá del tipo de problema en estudio. Para muestras inalteradas obtenidas bajo el nivel freático, se deben humedecer las piedras. Para suelos expansivos se debe efectuar el humedecimiento después de la aplicación de la fuerza normal, para evitar expansiones que no son representativas de las condiciones de campo.

**6.2.** Se debe permitir la consolidación de la muestra bajo una fuerza normal adecuada y previamente escogida. Inmediatamente después y tan pronto como sea posible aplicar la fuerza normal predeterminada, se llena el depósito de agua hasta un nivel por encima de la muestra, permitiendo el drenaje y por lo tanto la consolidación. El nivel del agua

se debe mantener durante la consolidación y en las fases siguientes de corte de tal manera que la muestra esté saturada en todo momento. Durante el proceso de la consolidación se deben registrar las lecturas de desplazamiento normal, en tiempos apropiados, antes de aplicar un nuevo incremento de la fuerza. Cada incremento de la fuerza normal debe durar hasta que se complete la consolidación primaria. El incremento final debe completar la fuerza o esfuerzo normal especificado. Se utilizará un procedimiento análogo y basándose en los mismos criterios que sean aplicables a los descritos en la norma INV E – 151, “Consolidación unidimensional de los suelos”. Se representan gráficamente las lecturas del desplazamiento o de la deformación normal contra el tiempo.

**Nota 7.** La fuerza o esfuerzo normal que se aplique a la muestra o probeta depende de la información requerida de lo que se desea evaluar en el ensayo. Cuando se aplica éste esfuerzo, un solo incremento puede ser apropiado para suelos relativamente firmes. Para los demás suelos pueden ser necesarios varios incrementos de esfuerzo, hasta llegar al requerido, con el objeto de prevenir el daño de la muestra. El primer incremento dependerá de la resistencia y de la sensibilidad del suelo. En general, esta fuerza no debe ser tan grande que haga fluir el material constitutivo de la muestra por fuera del dispositivo de corte.

**6.3.** Corte de la muestra – Luego de terminada la consolidación se deben soltar los marcos desbloqueándolos y separándolos aproximadamente 0.25 mm (0.01”), para permitir el corte de la muestra. Se debe aplicar la fuerza de corte lentamente para permitir la disipación completa del exceso de presión de poros. Para determinar la velocidad de aplicación de la carga hasta la falla, se podrá usar como herramienta la siguiente expresión:

$$t_f = 50t_{50}$$

donde:

$t_f$  = tiempo calculado para la falla.

$t_{50}$  = tiempo requerido por la muestra para lograr el 50% de consolidación bajo la fuerza normal.

**Nota 8.** Se debe garantizar que los tornillos de separación de los marcos de corte, luego de realizar su función y antes de iniciar el corte, se retraigan y no queden en contacto con el marco inferior. Además se deben remover los pines o tornillos usados para bloquear ambos marcos.

Cuando se realiza el ensayo por control de deformaciones, la velocidad de deformación se puede determinar aproximadamente, dividiendo la deformación de corte estimada para el máximo esfuerzo de corte por el tiempo estimado para la falla, como se indica al final de esta Sección. Se continúa el ensayo hasta que la muestra llegue a la falla, un criterio es cuando la muestra ya haya alcanzado su máximo esfuerzo de corte, frecuentemente se determina cuando el esfuerzo de corte se vuelve constante, el otro criterio es hasta cuando se logre una deformación del 10% del diámetro o de la longitud original de la muestra. En el ensayo con control de esfuerzos, se comienza con incrementos de la fuerza de corte de aproximadamente un 10% de la máxima estimada. Antes de aplicar un nuevo incremento, se permitirá por lo menos un 95 % de consolidación bajo el incremento anterior. Cuando se ha aplicado del 50% al 70% de la fuerza de falla estimada, los nuevos incrementos serán de la mitad del valor de los aplicados hasta ese momento, o sea el 5% de la máxima fuerza de corte. En la proximidad de la falla, los incrementos de la fuerza pueden ser iguales a un cuarto del incremento inicial (2.5 % de la fuerza normal de corte estimada). Se debe llevar registro de la fuerza de corte aplicada y la deformación normal y de corte para intervalos convenientes de tiempo. Con preferencia, el incremento de la fuerza de corte debe ser continuo.

En el ensayo con control de deformaciones, la velocidad de aplicación de cargas ( $v_c$ ) se puede determinar, aproximadamente, dividiendo el desplazamiento estimado de corte para la falla ( $d_f$ ), por el tiempo calculado para la falla ( $t_f$ ).

$$v_c = d_f/t_f$$

Como una guía para determinar, aproximadamente,  $d_f$ , el cual depende de muchos factores, se puede tomar como  $d_f = 12$  mm para suelos normalmente consolidados y,  $d_f = 5$  mm para suelos sobre consolidados.

- 6.4.** Terminado el ensayo, se remueve la muestra completa de la caja de corte, en el caso de suelos cohesivos se deslizarán completamente los marcos uno sobre el otro para calificar la superficie de corte formada, luego se secará en el horno la muestra y se determinará la masa de los sólidos.

**Nota 9.** Algunos suelos, tal como arena densa y arcilla sobre consolidadas, pueden no mostrar buena definición de la curva en el tiempo establecido. Consecuentemente, el cálculo de  $t_f$  puede producir estimaciones inapropiadas del tiempo requerido para fallar bajo condiciones de drenaje. Para arcillas sobre consolidadas, que son probadas bajo esfuerzos normales más bajos que la presión de pre-consolidación del suelo, se sugiere que el tiempo de falla estimado con el valor de  $t = 50$  equivalga a uno obtenido bajo el comportamiento de una consolidación normal.

En el caso de arenas limpias, se aproximará  $t_f = 10$  min. y para arenas de más de 5% de finos, se aproximará  $t_f = 60$  min. Los valores de  $t_f$  no son de obligatoriedad si se comprueba que se puede tomar otro valor de los especificados.

## 7. CALCULOS

Se debe determinar lo siguiente:

- 7.1. Contenido inicial de humedad.
- 7.2. Densidad seca inicial y densidad húmeda inicial.
- 7.3. Esfuerzos normales y de corte, que se calculan de la siguiente forma:
  - 7.3.1. Esfuerzo de corte nominal, que actúa en el espécimen:

$$t = F / A$$

donde:

t = esfuerzo nominal de corte, en kPa,

F = fuerza de corte, en N, y

A = área inicial del espécimen, en mm<sup>2</sup>.

- 7.3.2. Esfuerzo normal que actúa en el espécimen:

$$h = N / A$$

donde:

h = esfuerzo normal, en kPa, y

N = fuerza normal que actúa sobre el espécimen, en N.

- 7.4. La velocidad de desplazamiento. Se calcula la velocidad de corte real dividiendo el desplazamiento relativo lateral por el tiempo transcurrido o se reporta la velocidad usada para la prueba.

$$d_r = d_h / t_e$$

donde:

d<sub>r</sub> = velocidad de desplazamiento, Mm/min,

d<sub>h</sub> = desplazamiento relativo lateral, mm, y

t<sub>e</sub> = tiempo transcurrido de la prueba, min.

- 7.5. Las deformaciones o desplazamientos laterales y normales.
- 7.6. Relación de vacíos antes y después de la consolidación y después del ensayo de corte, si se desea.
- 7.7. Los grados de saturación inicial y final, si se desea.

## **8. INFORME**

El reporte debe incluir lo siguiente:

- 8.1. Descripción del tipo de dispositivo utilizado en el ensayo.
- 8.2. Identificación y descripción de la muestra, incluyendo si el suelo es inalterado, remoldeado, compactado o preparado por otros medios, anotando cualquier característica no usual, referente por ejemplo a la estratificación.
- 8.3. Contenido inicial de agua.
- 8.4. Densidad seca inicial y densidad húmeda inicial.
- 8.5. Espesor inicial.
- 8.6. Se deben registrar todos los datos básicos del ensayo, incluyendo el esfuerzo normal, el desplazamiento normal, el desplazamiento de corte y los valores correspondientes a la resistencia al corte máximo y residual, cuando se indique.
- 8.7. Para cada probeta de ensayo se debe elaborar la curva esfuerzo de corte y deformación unitaria en un gráfico con escalas aritméticas y

demás gráficos adicionales que sean requeridos según el fenómeno que se desee estudiar.

- 8.8.** Se debe preparar, igualmente, un gráfico que incluya los valores para las tres probetas de las fuerzas normales contra la resistencia al corte y determinar, a partir del mismo, los valores efectivos del ángulo de fricción  $f'$  y de la cohesión,  $c'$ .
- 8.9.** Se debe incluir el plan general de procedimiento, así como secuencias especiales de carga o requisitos especiales de humedad.

## **9. NORMAS DE REFERENCIA**

ASTM D 3080 – 98

AASHTO T 236 – 03

# ANEXO K

**NORMAS DE INVIAS I.N.V. E – 152 – 07  
ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA**

# COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS

I.N.V. E – 152 – 07

## 1. OBJETO

**1.1.** El objeto de esta norma es indicar la forma de realizar el ensayo para determinar la resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos bajo condiciones inalteradas o remodeladas, aplicando carga axial, usando cualquiera de los métodos de resistencia controlada o deformación controlada.

Este ensayo se emplea únicamente para suelos cohesivos, ya que en un suelo carente de cohesión no puede formarse una probeta sin confinamiento lateral.

Este ensayo no es un sustituto del ensayo compresión triaxial no consolidado no drenado descrito en la norma INV E – 153.

**1.2.** Resistencia a la compresión inconfiada, es la carga por unidad de área a la cual una probeta de suelo, cilíndrica o prismática, falla en el ensayo de compresión simple.

**1.3.** Los valores en unidades SI deben considerarse como norma. Los valores en paréntesis son de información, únicamente.

**1.4.** Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es de responsabilidad de quien la emplee, el establecimiento de prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y la aplicación de limitaciones regulatorias, con anterioridad a su uso.

## **2. EQUIPO**

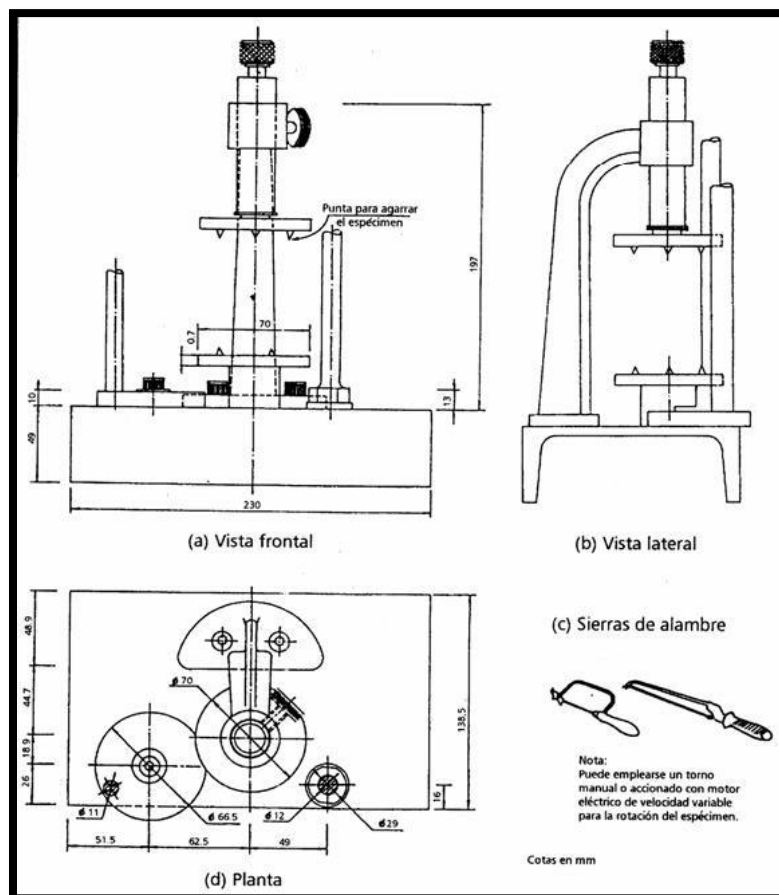
- 2.1.** Aparato de Compresión – Conformado por una prensa para rotura de las probetas, de velocidad controlada manual o mecánicamente, con capacidad suficiente para llegar a la carga de rotura. El dispositivo de medida de la fuerza aplicada debe tener una sensibilidad del 1 % de la resistencia a la compresión simple de la muestra ensayada.
- 2.2.** Extractor de muestras – Capaz de sacar corazones de suelos; si las muestras llegan al laboratorio en tubos no abiertos longitudinalmente, es preciso que produzca poca alteración en el suelo.
- 2.3.** Un torno – Con motor o tallador de probetas de muestras inalteradas con accesorios (sierra de alambre, cuchillos, caja de ingletes, etc.). (Ver Figura 1).
- 2.4.** Moldes – Para preparar probetas de suelo amasado o compactado.
- 2.5.** Aparatos para determinar la humedad de la muestra según se indica en la norma INV E – 122.
- 2.6.** Un cronómetro – Si el control de la prensa es manual.
- 2.7.** Un calibrador – Con nonio capaz de medir las dimensiones físicas de la probeta con aproximación de 0.1 mm.
- 2.8.** Balanzas – Que den el peso de la muestra con una precisión del 0.1 % de su peso total.

- 2.9.** Horno – Capaz de mantener una temperatura de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$  ( $230^{\circ} \pm 9^{\circ} \text{ F}$ ).

### **3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**

- 3.1.** Dimensiones de la probeta – La probeta debe ser de sección aproximadamente constante, circular o cuadrada, y eje perpendicular a dicha sección. Su diámetro o lado no debe ser inferior a 30 mm (1.3 in.) y en suelos que presentan discontinuidades se recomienda que sea de mayor tamaño. La mayor partícula contenida en su interior debe ser, como máximo, igual a 1/10 del diámetro o lado. Si, una vez terminado el ensayo, se encuentran partículas mayores que dicho tamaño, se hará constar esto, junto con los resultados. Para muestras con diámetro igual o mayor de 72 mm (2.8 in.), el tamaño de la partícula deberá ser menor a 1/6 del diámetro o lado. La relación de la altura al diámetro o al lado de la base se debe encontrar entre 2 a 2.5. El término probeta se aplica a la muestra ya tallada. Cuando la altura no cumpla con las dimensiones indicadas, se deberá anotar en el Informe. La dimensión longitudinal de la probeta cortada debe coincidir con la dirección vertical de la muestra original.
- 3.2.** Probetas inalteradas – Si se trata de muestras de tubo, hay que manejarlas con gran cuidado para evitar su alteración, cambios en la sección transversal o la pérdida de humedad.
- 3.2.1.** Si se teme que el dispositivo de extracción pueda dañar la muestra, se puede hendir el tubo longitudinalmente o cortarlo en trozos más pequeños para facilitar la extracción de la muestra sin alterarla.

- 3.2.2.** Si se trata de arcilla no dura, se recomienda, cuando sea posible, tallar la muestra para eliminar las zonas alteradas próximas a las paredes del tubo. En general, se deben desechar las partes alteradas de la muestra.
- 3.2.3.** En caso de disponerse de cámara húmeda, las operaciones de tallado se deben realizar en ella con el fin de que el suelo permanezca el menor tiempo posible expuesto a la pérdida de humedad. Se puede emplear un torno o tallador como el de la Figura 1, y para recortar los extremos la sierra de alambre y una caja de ingletes.



**Figura 1.** Torno tallador de probetas

Para evitar el desarrollo de fuerzas capilares que se consideren importantes, en cuanto una probeta haya sido cortada, se envuelve en papel celofán o encerado, o se coloca en un recipiente hermético a menos que inmediatamente se realice el ensayo. Si lo que queda de la muestra inalterada original se va a usar otra vez, se debe cubrir nuevamente.

- 3.2.4.** Cuando los extremos de la probeta quedan irregulares debido a la existencia de piedras, desmoronamiento de la muestra, etc., se deben igualar las caras rellenando los pequeños agujeros con suelo de los cortes. Si se trata de muestras duras, es conveniente refrentar las caras de modo que queden perfectamente paralelas. Esto se puede hacer mediante un corte de precisión o añadiendo una capa de azufre o material duro análogo en un "refrentador".
- 3.2.5.** Se determina la masa de las probetas y separadamente se toma una muestra para determinar la humedad. La masa debe excluir la capa de material utilizado para refrentar la probeta.
- 3.3.** Probetas Remoldeadas – Si se desea ensayar una muestra de arcilla saturada "remoldeada", por ejemplo para determinar la sensibilidad, se procede del siguiente modo: se amasa perfectamente el suelo de modo que se destruya completamente su estructura anterior. Si se desea conservar la humedad que tenía la muestra original, es conveniente envolver el material en una membrana de caucho fino durante esta operación.
  - 3.3.1.** Para formar el espécimen se puede emplear un tubo metálico cilíndrico hueco de altura algo mayor que el doble del diámetro, en

cuyo interior penetra un cilindro de madera del mismo diámetro que la probeta, cubierto con un disco de aluminio. Las paredes del tubo hueco se deben lubricar con vaselina.

**3.3.2.** La probeta se moldea contra el disco de aluminio, y se hace retroceder el cilindro de madera a medida que se añade más arcilla. Hay que tener cuidado de que no se introduzca aire en la probeta durante esta operación, con el objeto de mantener el grado de saturación anterior al amasado. Cuando dentro del tubo haya un cilindro de arcilla de altura un poco superior al doble del diámetro, se empuja el cilindro de madera en sentido contrario para extraer la muestra.

**3.3.3.** Para efectos de esta norma, la sensibilidad se define como el cociente entre la resistencia a la compresión simple de la muestra inalterada y la resistencia a la compresión simple de la muestra remoldeada sin pérdida de humedad. Como es inevitable que durante las operaciones citadas la muestra pierda algo de humedad, puede ser conveniente realizarlas con las manos algo húmedas, o bien obtener la resistencia de la muestra remoldeada a partir de un gráfico que relacione la resistencia y la humedad en dichas muestras. En muchos casos, puede ser conveniente remoldear la muestra con los mismos restos de la inalterada una vez rota. En tales circunstancias, no es posible hallar la humedad en la muestra inalterada con la totalidad de la probeta.

**3.4.** Probetas compactadas – También se puede compactar una muestra en un molde a una humedad y peso unitario prefijado. Después de que la probeta se haya formado, se le cortan extremos perpendiculares al eje

longitudinal, se extrae del molde y se determinan su masa y dimensiones.

**Nota 1.** La experiencia indica que es difícil manejar, compactar y obtener resultados válidos con probetas que tienen un grado de humedad superior al 90 % de saturación de la muestra de suelo.

#### **4. PROCEDIMIENTO**

- 4.1.** Se miden tres alturas de la probeta cada una separada 120 grados de la otra y tres diámetros en las tres líneas imaginarias centrales que resultan de dividir la probeta en cuartos, con una precisión de 0.1 mm mediante un calibrador con nonio o un objeto análogo. En probetas de gran tamaño puede adoptarse una precisión menor y proporcional al tamaño de la muestra.
- 4.2.** Se determina la masa de la muestra.
- 4.3.** Se coloca la probeta en la prensa de modo que quede perfectamente centrada. Se acciona el dispositivo de avance lo estrictamente necesario para que la probeta toque a la placa superior de la prensa. Se pone en cero el indicador de deformaciones. El ensayo se podrá hacer controlando la deformación o controlando la carga.
- 4.4.** Para el caso de la deformación controlada, se acciona la prensa de modo que la velocidad de deformación unitaria de la probeta esté comprendida entre  $\frac{1}{2}$  % y 2% por minuto. Se toman medidas de las deformaciones y de las cargas cada 30 segundos hasta que las cargas comiencen a disminuir o hasta llegar a una deformación axial del 15% (lo que antes suceda). Se escogerá una velocidad en que la rotura

ocurra en un lapso entre 1 y 10 minutos. En el caso de materiales muy blandos que exhiben deformaciones mayores a la falla, deberán ensayarse a una tasa mayor de deformación y lo inverso para los materiales duros o quebradizos. Si se trata de una probeta de suelo muy duro, en la cual la deformación a la rotura sea muy pequeña, la curva esfuerzo-deformación no quedará debidamente representada en dicho gráfico. En ese caso, es posible desprestigiar el aumento de sección durante la carga. Cuando interesa hallar el módulo de deformación en probetas de suelo muy duro, es conveniente medir la deformación mediante extensómetros o por otro procedimiento que elimine las deformaciones en la base.

- 4.5.** Cuando se empleen esfuerzos controlados, se aplicará la carga para que produzca una deformación axial a una tasa de 0.50% a 2% por minuto y se registrarán los esfuerzos y las deformaciones cada 30 segundos. La tasa de deformación se regulará en tal forma que la falla de probetas sin refrentar nunca sobrepase de 10 minutos. La carga se deberá proseguir hasta que decrezcan los valores de la carga con el aumento de sección que se produce en la probeta durante la rotura, lo cual se traduce en una disminución del esfuerzo aplicado.
  
- 4.6.** Se hace un esquema de la forma de rotura. Si la rotura se produce a través de un plano inclinado, es conveniente medir el ángulo de inclinación de dicho plano.
  
- 4.7.** De la parte de la probeta en donde se ha producido la rotura se toma una pequeña muestra en el recipiente y se determina su humedad. También se determina la humedad de toda probeta, anotando las masas y haciendo las operaciones que se indican en la hoja de cálculos.

## 5. CÁLCULOS

5.1. La deformación unitaria,  $\epsilon$ , se calculará con la siguiente fórmula:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

donde:

$\epsilon$  = deformación unitaria axial para la carga dada,

$\Delta L$  = cambio en longitud de la muestra, igual al cambio entre la lectura inicial y final del indicador de deformación, y

$L_0$  = longitud inicial de la muestra.

5.2. Se calcula la sección transversal promedio de la muestra,  $A$ , para una carga dada así:

$$A = \frac{A_0}{1 - \epsilon}$$

donde:

$\epsilon$  = deformación unitaria axial para la carga dada, y

$A_0$  = área inicial promedio de la probeta.

$$A_0 = \frac{A_t + 2A_m + A_b}{4}$$

donde:

$A_t$  = área en la parte superior de la probeta,

$A_m$  = área en la parte media de la probeta, y

$A_b$  = área de la parte inferior de la probeta.

El área  $A$ , se puede calcular alternativamente a partir de dimensiones obtenidas por medición directa, cuando se pueden medir las superficies de la probeta.

**5.3.** Es útil preparar un gráfico que dé, para cada deformación, el área corregida correspondiente, de acuerdo con los diámetros iniciales de las muestras que se empleen en el ensayo, como se ilustra en la Figura 2.

**5.4.** Se calcula el esfuerzo,  $\sigma_c$ :

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

donde:

$p$  = carga aplicada dada, y

$A$  = área de la sección promedio correspondiente.

**5.5.** Se prepara un gráfico que muestre la relación entre el esfuerzo (ordenada) y la deformación unitaria (en las abscisas). Se toma el valor mayor de la carga unitaria o el que corresponda al 20% de deformación, el que ocurra primero entre las dos, y se informa como resistencia a la compresión inconfiada. Siempre que se considere necesario para una interpretación adecuada, se incluirá el gráfico correspondiente en el Informe. (Ver Figura 3).

**5.6.** La resistencia a la compresión inconfiada se emplea también para calificar la consistencia del suelo como muy blanda, blanda, mediana, firme, muy firme y dura de acuerdo con el valor obtenido en la siguiente forma:

Consistencia del Suelo	Resistencia a la Compresión Inconfinada	
	Kg/cm <sup>2</sup>	(kPa)
Muy blanda	< 0.25	( < 25)
Blanda	0.25-0.50	( 25 -50)
Mediana	0.50-1.00	( 50 - 100)
Firme	1.00-2.00	(100 - 200)
Muy firme	2.00-4.00	(200 - 400)
Dura	>4.00	(> 400 )

5.7. Mediante la masa y la humedad de la probeta se calcula la masa unitaria según se indica en la hoja de cálculos.

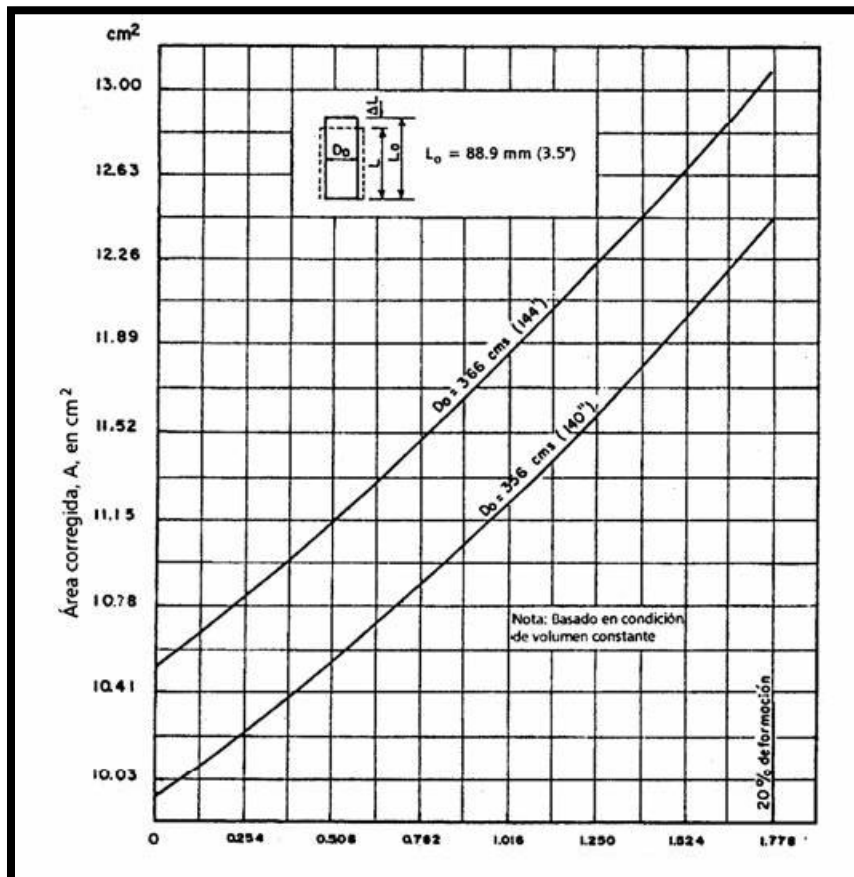


Figura 2. Área vs. Cambio de longitud

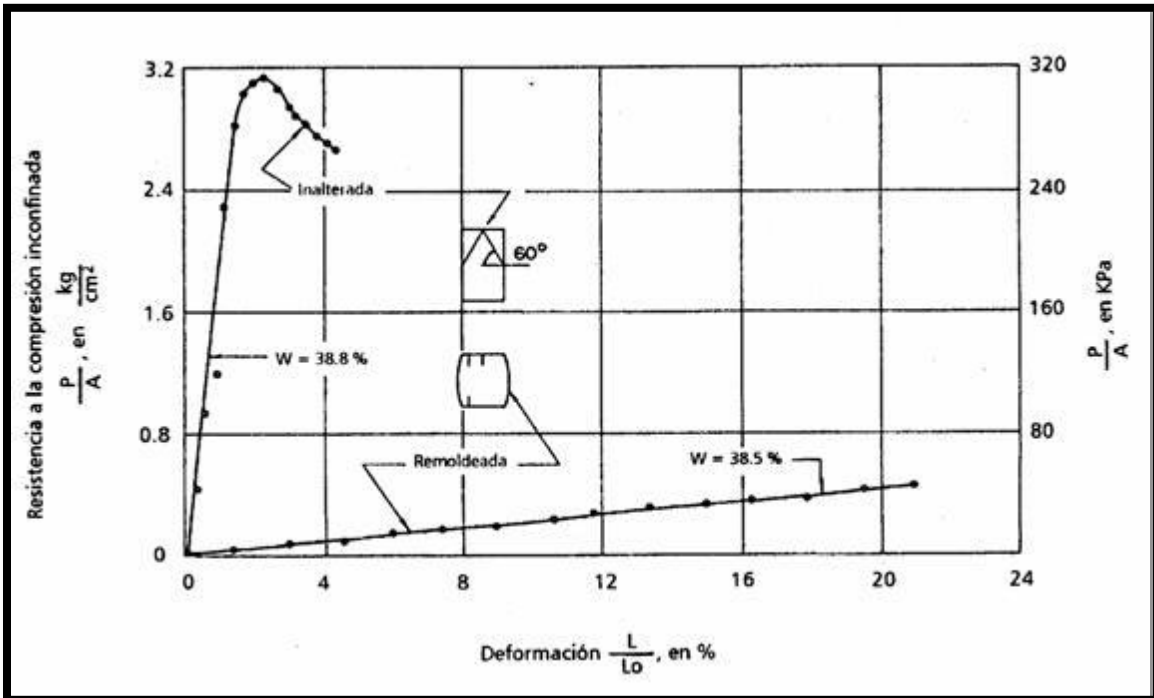


Figura 3. Ensayo de compresión inconfínada

## 6. INFORME

El informe deberá incluir lo siguiente:

- 6.1. Resistencia a la compresión inconfínada.
- 6.2. Tipo y tamaño del espécimen:
  - Inalterado
  - Compacto
  - Remoldeado
  - Cilíndrico o Prismático
- 6.3. Relación altura-diámetro
- 6.4. Descripción visual: nombre del suelo, símbolo, etc.

- 6.5. Masa unitaria inicial, humedad y grado de saturación (si se saturó en el laboratorio, se anota el grado alcanzado).
- 6.6. Deformación promedio a la falla, en porcentaje.
- 6.7. Rata promedio de deformación a la falla, en porcentaje.
- 6.8. Observaciones – Se anota cualquier condición no usual u otros datos que se consideren necesarios para interpretar adecuadamente los resultados.

## **7. PRECISIÓN Y TOLERANCIAS**

- 7.1. Actualmente no existe un método que permita evaluar la precisión de un grupo de ensayos sobre muestras inalteradas, debido a la variabilidad de las probetas. Muestras de suelo inalterado de depósitos aparentemente homogéneos procedentes del mismo lugar, a menudo presentan diferentes resistencias y relaciones esfuerzo-deformación.
- 7.2. Aún no se ha desarrollado un método de ensayo y un procedimiento de preparación de muestras, para la determinación de la discrepancia de diferentes laboratorios, debido a la dificultad para producir probetas de suelos cohesivos idénticas. No es posible hacer estimación de la precisión en este método de ensayo.

## **8. NORMAS DE REFERENCIA**

NLT 202

AASHTO T 208 – 05

ASTM D 2166 – 00