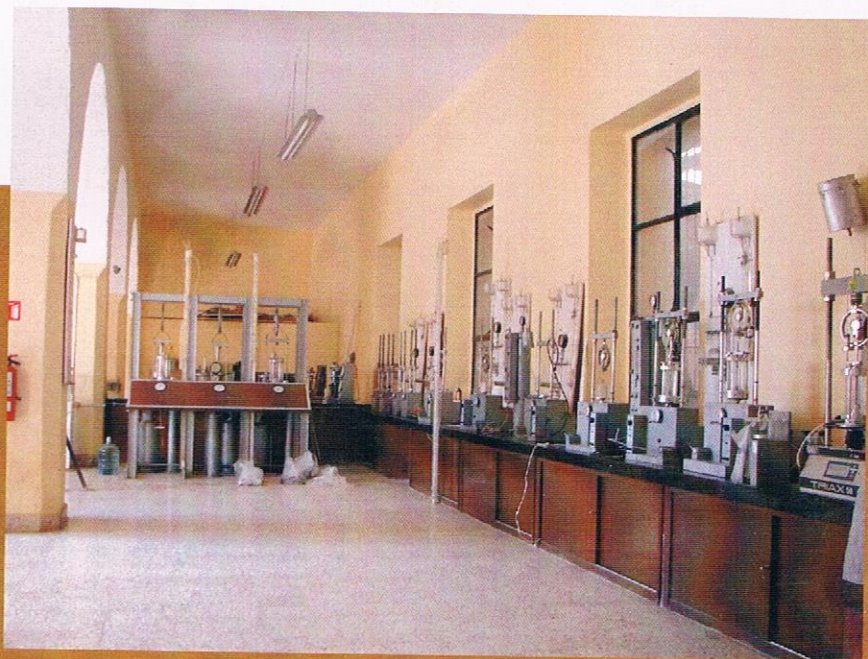




# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

## DEPARTAMENTO DE IRRIGACIÓN



# MANUAL DE PRÁCTICAS DEL LABORATORIO DE

## MECÁNICA DE SUELOS

## PRUEBAS DE LABORATORIO

### INDICE

PRUEBAS DE LABORATORIO .....	1
I PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS .....	2
II GRANULOMETRÍA .....	4
III DENSIDAD .....	14
IV COMPACTACIÓN .....	19
V DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG.....	22
VI DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD .....	31
VII CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL .....	42
VIII RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE.....	53

## I PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

El material obtenido de un muestreo está formado en general por grava y grumos de tierra. Las pruebas que se describirán más adelante, tales como densidad, compactación, límites de consistencia, compresión triaxial, etc., se hacen con la porción de la muestra que pasa por el tamiz número 4. El material que queda retenido en él, se desecha para la mayoría de las pruebas.

Al preparar la muestra para su ensaye, es necesario desmoronar los grumos por medio de un pisón de madera, pero in romper las partículas o fragmentos de roca. Igualmente debe evitarse que se pierda el material más fino, al operar. Debe, por tanto, trabajarse con sumo cuidado.

### Equipo.

- ♦ Charola de hierro o madera revestida con lámina, de 1.20 x 0.80 x 0.20 m. y pisón para romper los grumos.
- ♦ Juego de mallas de los siguientes tamaños: 76.2 mm. (3"), 0.8 mm. (2"), 38.1 mm. (1.5"), 25.4 mm. (1"), 19.1 mm. (3/4"), 12.7 mm. (1/2"), 9.5 mm. (3/8") y 4.69 mm. (Núm. 4.)
- ♦ Báscula de 120 kg., y balanza de torsión de 0.1 g. de aproximación.

### Procedimiento.

- 1.- Se obtiene el peso total de la muestra húmeda tal como lega del campo.
- 2.-Se vacía la muestra sobre la charola y se separa la grava con la mano o con la ayuda de una malla.
- 3.-Se desmoronan los grumos de tierra con el pisón.
- 4.-Por la malla Núm. 4 (4.69 mm.) se pasa el material desmoronado, clasificándolo en dos grupos.
- 5.-Se guarda la muestra de material que ha pasado por la malla Núm. 4 (4.69 mm.) en un cajón debidamente identificado, para ser usado en pruebas posteriores; y, cuando sea necesario, guárdese también la grava.
- 6.- Se pone en una cápsula una muestra (100 g. aproximadamente) de material que ha pasado la malla Núm. 4 (4.69 mm) para determinar su humedad o contenido de agua inicial  
(Nota: La humedad y el contenido de agua son sinónimos)
- 7.-Se pesa en la balanza de torsión el material en estado húmedo, anotando el número de la cápsula; se introduce en o horno de secado a temperatura constante (105° C); después de 12 o más horas de permanencia en él, se deja enfriar la cápsula y la tierra en un desecador y finalmente se pesa.



La relación 
$$: \frac{\text{Peso húmedo con cápsula} - \text{Peso sec o con cápsula}}{\text{Peso sec o con cápsula} - \text{Peso cápsula}} \times 100$$
 es el contenido de agua o porcentaje de humedad ( $\omega$ ).

Para determinar el peso de la muestra total seca, debe también obtenerse el contenido de agua del material que no pase la malla Núm. 4 (4.69 mm.), si el porcentaje de este material grueso respecto al total es mayor del 20%. El peso seco de una muestra se obtiene como sigue:

$$\text{Peso de muestra seca} = \frac{\text{Peso de muestra húmeda}}{1 + \text{Humedad expresada en fracción decimal}}$$

En el registro de Análisis Granulométrico, debe anotarse el peso total de muestra seca, por lo que es necesario corregir el peso de la muestra traída del campo, tomando en cuenta las humedades de las porciones del material que pasó y el que quedó retenido en la malla Núm. 4 (4.69 mm.).

### Ejemplo:

Peso de la muestra traída del campo	37.000 kg.
Peso del envase	0.605 kg.
Peso neto de la muestra húmeda	36.395 kg.
Peso del material retenido en la m a 11 a Núm. 4 (4.69 mm.)	9.147 kg.
Peso del material que pasa la malla Núm. 4 (4.69 mm.)	27.248 kg.
Porcentaje de humedad del material retenido en la malla Núm. 4 (4.69 mm.)	0%
Porcentaje de humedad del material que pasa por la malla Núm. 4 (4.69 mm.)	5.40%
Peso del material seco que pasa por la maba Núm. 4 (4.69 mm.)	25.853 kg.
Peso seco de la muestra total, 25.853 + 9.147	35.000 kg.

## II GRANULOMETRÍA

El análisis granulométrico de un suelo consiste en separar y clasificar por tamaños los granos que lo componen.

A partir de la distribución de los granos en un suelo, es posible formarse una idea aproximada de otras propiedades del mismo.

Según su composición, la granulometría puede determinarse por medio de mallas, por el método del hidrómetro, o bien, combinando ambos.

El análisis mecánico se concreta a segregar el suelo por medio de una serie de mallas, que definen el tamaño de la partícula.

El método del hidrómetro se basa en la aplicación de la ley de Stokes a una esfera que cae libremente en un líquido.

El análisis combinado o total, consiste en la aplicación de los métodos antes citados, a las porciones gruesa y fina de un mismo material; este es el caso que comúnmente se presenta en las tierras que se emplean en la construcción de presas de tierra.

- ♦ ANÁLISIS POR MALLAS. El análisis por mallas se efectúa con la muestra íntegra.

Material mayor que la malla Núm. 4 (4.69 mm.). El material retenido en la malla Núm. 4 (4.69 mm.) se pasa a través de las mallas de 76.2 mm. (3"), 50.8 mm. (2"), 38.1 mm. (1.4"), 25.4 mm. (1"), 19.1 mm. (0.75"), 12.7 mm. (0.5") y 9.5 mm. (0.375"), colocándolas en este orden y agitando el juego con movimientos horizontales y verticales combinados.

Se pesa la fracción retenida en cada malla, y se anota en la hoja de registro de "análisis granulométrico".

- ♦ Material menor que la malla Núm. 4 (4.69 mm.). En este análisis la cantidad de suelo requerido, depende de los finos que contenga:
  - Suelos arcillosos y limosos 500 g.
  - Suelos arenosos 500 a 1,000 g.

### Equipo

- ♦ Juego de mallas: Núms. 8 (2.38 mm.), 14 (1.19 mm.), 28 (0.59 mm.), 48 (0.297 mm.), 100 (0.149 mm.), 200 (0.074 mm.), charola y tapa.
- ♦ Balanza de torsión o eléctrica, de 0.1 g. de aproximación.
- ♦ Horno de temperatura constante de 105°C.
- ♦ Cápsulas de 25 cm. de diámetro.
- ♦ Brocha.
- ♦ Piseta.

### Procedimiento

Análisis sin lavado:



- 1.- Se pone a secar la muestra en el horno a 105°C. Se deja enfriar a la temperatura ambiente y se pesa la cantidad requerida para hacer la prueba.
- 2.- Se desmoronan cuidadosamente los grumos de material en un trozo escuadrado de madera para evitar romper los granos.
- 3.- Se coloca el juego de mallas en orden progresivo de la Núm. 8 (2.38 mm.) a la Núm. 200 (0.074 mm.) y al final la charola; vaciando el material previamente pesado, en la malla Núm. 8 (2.38 mm.). En seguida se coloca la tapa.
- 4.- Se agita todo el juego de mallas horizontalmente, con movimiento de rotación y verticalmente, con golpes secos de vez en cuando. El tiempo de agitado depende de la cantidad de finos de la muestra, pero, por lo general, no debe ser menor de 15 minutos.  
Es muy conveniente el uso del aparato Ro-Tap, especialmente diseñado para esta operación.
- 5.- Se quita la tapa y se separa la malla Núm. 8 (2.38 mm.), vaciando la porción de suelo que ha sido retenida en ella, sobre un papel limpio. A las partículas que se detienen entre los hilos de la malla, no hay que forzarlas a pasar a través de ella; inviértase ésta y con ayuda de una brocha o un cepillo de alambre, despréndanse las partículas y agréguese a las depositadas en el papel.
- 6.- En forma semejante se procede con las demás mallas.
- 7.- Se pesan las porciones retenidas en cada malla y en la charola del fondo, anotando las cantidades en el registro de cálculo.  
Se conservan las porciones de muestra en sus respectivos papeles, hasta verificar que la suma de los pesos parciales es igual al peso inicial no segregado, con una tolerancia de medio por ciento, por pérdidas de operación.

### Análisis con lavado:

- 1.- Se repiten las dos primeras operaciones del procedimiento anterior, secando, desmoronando los grumos con un rodillo y pesando la cantidad de muestra necesaria. Después se pone la muestra en una cápsula de 30 cm. (12") de diámetro; se le agrega agua y se deja remojar hasta que se puedan deshacer los grumos.
- 2.- Se vacía el contenido de la cápsula sobre la malla Núm. 200 (0.074 mm.) y con la ayuda de agua, lávese lo mejor posible la muestra, para que todos los finos pasen por ella. El material que pase a través de la malla Núm. 200 (0.074 mm.) se analizará por otros métodos en caso de ser necesario.
- 3.- El material retenido en la malla Núm. 200 (0.074 mm.) se coloca en una cápsula, lavando la malla con agua.
- 4.- Se seca el contenido de la cápsula en la estufa y se pesa.

5.-Con el material seco del paso anterior, se repiten las etapas 3, 4, 5, 6 y 7 del análisis sin lavado. Se obtienen así los pesos de las fracciones retenidas en cada una de las mallas y se anotan en el registro correspondiente.

*Cálculo:*

1.- Se suman los pesos retenidos en cada malla y se verifica ese total con el peso de la muestra que se colocó originalmente en el juego de mallas. Si el error excede del 0.5%, vuélvase pesar cada fracción. Si el error es menor, se le atribuye al eso de la fracción más grande.

2.- Se calculan los porcentajes del material retenido en cada malla respecto del peso seco de la muestra original. Se anotan en el registro.

3.- Se determinan los porcentajes acumulados del material que ha pasado por cada malla, restando de 100% el porcentaje parcial retenido en la primera malla. A este valor se le resta el porcentaje parcial retenido en la segunda malla y así sucesivamente.

4.-Al efectuar el análisis por mallas grandes, se conoce el porcentaje del material que pasa la malla Núm. 4 (4.69 mm.), respecto del total. Multiplicando este valor por cada uno de los porcentajes parciales, acumulativos menores que la malla Núm. 4 (4.69 mm.), se obtienen los porcentajes acumulados con respecto a la muestra total.

5.-Con los valores obtenidos de % acumulativo que pasa, se construye la gráfica correspondiente.

- ♦ ANÁLISIS POR VÍA HÚMEDA. La clasificación granulométrica de la fracción fina de una muestra (material que pasa por la malla Núm. 200 (0.074 mm.), se determina por los procedimientos que se describen a continuación, ambos basados en la ley de Stokes.

▬ Decantación separada. El método consiste en determinar el porcentaje, en peso de sólidos, de partículas de un diámetro determinado extrayendo muestras de una suspensión inicialmente uniforme, a tiempos conocidos y de un punto cuya distancia a la superficie libre del líquido es también conocida. Para ello, se coloca en una probeta o cilindro metálico de 1,000 cm.<sup>3</sup> de capacidad y 5 cm. de diámetro, la porción que se desea estudiar, mezclada con agua defloculada, con una concentración dada de suelo; se agita para distribuir uniformemente los granos en el líquido y se deja en reposo. De acuerdo con la ley de Stokes para una temperatura T y una misma densidad de los sólidos en suspensión, la velocidad de caída de las partículas es proporcional al cuadrado de sus diámetros; en consecuencia, si de un punto fijo del líquido, que dista una altura h de la



superficie, y transcurrido cierto tiempo t de iniciada la sedimentación, se toma una muestra de la suspensión, es posible determinar el porcentaje en peso, de las partículas contenidas en la muestra cuyo diámetro equivalente es menor que d.

$$d = \sqrt{\frac{18\nu}{S_s - S_w} \frac{h}{t}}$$

donde

y es la viscosidad cinemática del agua a la temperatura T del experimento

s la densidad de las partículas y s la densidad del agua a la temperatura T

Las muestras de suspensión tomadas a distintos tiempos se dejan secar dentro del horno, a fin de obtener el peso seco de sólidos y poder calcular los porcentajes que representan con respecto a la muestra total.

Para abreviar el cálculo de los diámetros, el Dr. A. Casa- grande construyó el ábaco, para un cilindro de las dimensiones antes indicadas, estando el punto de extracción a 20 cm. de la superficie libre del líquido. Dada la densidad de las partículas, temperatura de la suspensión y tiempo transcurrido, se obtiene, en la forma que se observa en la Figura 1, el diámetro equivalente mayor de las partículas contenidas en la muestra.

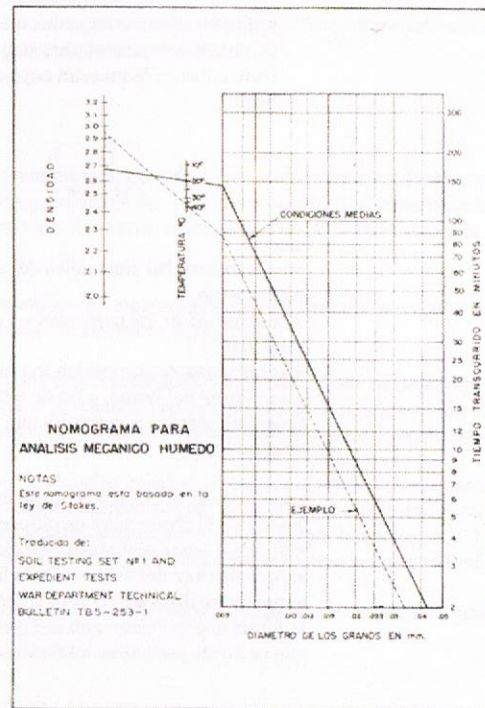


Figura 1.-Nomograma de Casagrande para el análisis mecánico húmedo

**Equipo**

- ♦ Cilindro de sedimentación de las siguientes características:
- ♦ Diámetro interior, 5 cm. (2"), altura, 55 cm, Marca de aforo a 1,000 cm<sup>3</sup>, Orificio de 2.38 mm. (3/32") de diámetro, 20 cm. debajo de la marca de 1,000 cm<sup>3</sup>.
- ♦ Tapón de madera para el orificio.
- ♦ Matraz graduado de 100 cm<sup>3</sup>.
- ♦ Cronómetro.
- ♦ Balanza Cenco de 3 barras, aproximación de 0.01 g. o balanza eléctrica.
- ♦ Horno de temperatura constante de 105°C.
- ♦ Malla Núm. 100 (0.149 mm.)
- ♦ Cápsulas de 25 cm. de diámetro.
- ♦ Cápsulas de 12 cm. de diámetro.
- ♦ Bote de 25 lt.
- ♦ Estufa.
- ♦ Piseta.
- ♦ Pipeta.
- ♦ Espátula de abanico.



- ♦ Defloculante.

**Procedimiento:**

- 1.-Se toman aproximadamente 500 g. del suelo que ha pasado por la malla Núm. 4 (4.69 mm.) y se desmoronan con un rodillo. Se deja remojar el material en una charola con agua, de 12 a 24 horas; después se vacía su contenido en la malla Núm. 100 (0.149 mm.), colocada sobre un bote para recoger todo el material fino.
- 2.-Se deja reposar la suspensión contenida en el recipiente, durante 24 horas por lo menos, para que se asienten los sólidos y después se extrae el agua por medio de un sifón. Debe procederse con mucho cuidado al operar con el sifón, para evitar arrastres del material decantado.
- 3.-El material asentado en el bote se recoge en una cápsula y se mete al horno para tener los sólidos secos.
- 4.-Una vez seco el material, se deja enfriar dentro de un desecador. Después se pesan 100g para hacer el análisis granulométrico, si el material es arenoso, y 50 g. si es arcilloso.
- 5.-Teniendo cuidado de no perder material, una vez pesado, se coloca en una cápsula de porcelana y se le agregan 20 cm<sup>3</sup> de defloculante y el agua necesaria para cubrir los sólidos dentro del recipiente.
- 6.- Se vacía la suspensión en el cilindro de sedimentación, lavando la cápsula para remover todos los finos. Después se le añade agua hasta la marca de 1,000 cm<sup>3</sup>.
- 7.- Se agita el cilindro vigorosamente durante un minuto, cubriendo con la palma de la mano el extremo abierto del mismo.
- 8.- Se pone el cilindro en una mesa o banco firme, protegido de cambios bruscos de temperatura, y se toma la temperatura de la suspensión, para entrar al ábaco de Casagrande. Después de transcurrido el tiempo de reposo calculado para un determinado diámetro de partícula, se quita el tapón del orificio y se recogen 100 cm<sup>3</sup> de la suspensión en una probeta graduada.
- 9.-Se vierten los 100 cm<sup>3</sup> de suspensión en una cápsula. Se deja evaporar el agua en un horno o estufa. Después de enfriarse, se pesa el sedimento con una aproximación de 0.01 g.
- 10.-Se repone el agua necesaria para enrasar la marca de 1,000 cm<sup>3</sup> en el cilindro de sedimentación y se procede del modo indicado en 7, 8 y 9 para otros diámetros de partícula. Con los pesos secos obtenidos, se calculan los porcentajes correspondientes a cada diámetro de partícula.
- 11.- Para relacionar los porcentajes parciales obtenidos en el cilindro de decantación, con el material grueso de la muestra, multiplíquese el valor del

porcentaje acumulativo correspondiente a la malla Núm. 200 (0.074 mm.), por cada uno de los anteriores, y con estos valores dibújese la curva de distribución granulométrica.

☞ Método del Hidrómetro. Este método es el más usado para hacer la determinación indirecta de los diámetros  $d$  y las fracciones  $N$  de partículas finas, es decir, las que pasan a través de la malla Núm. 200 (0.074 mm.). Por medio de este aparato es posible conocer la ley de variación del peso volumétrico de una Suspensión a medida que transcurre el tiempo, y determinar, aplicando la ley de Stokes, los diámetros equivalentes de las partículas que, al sedimentarse, pasan a la altura del centro de carena del hidrómetro.

Durante los dos primeros minutos del ensayo, el hidrómetro debe permanecer sumergido dentro de la suspensión y en tal caso la fórmula para calcular los diámetros de las partículas es:

$$d = \sqrt{\frac{18\mu}{\gamma_w(S_s - 1)}} \sqrt{\frac{Z}{t}}$$

En las lecturas subsecuentes, para las cuales el hidrómetro se introduce cada vez, la fórmula es:

$$d = \sqrt{\frac{18\mu}{\gamma_w(S_s - 1)}} \sqrt{\frac{Z_r \frac{V_{ii}}{2A_j}}{t}}$$

En donde:

- $d$ : Diámetro equivalente de la partícula.
- $\mu$ : Viscosidad del líquido.
- $\gamma_w$ : Peso volumétrico del agua.
- $S_s$ : Densidad de los sólidos.
- $Z_r$ : Altura de caída.
- $A_j$ : Área de la sección transversal de la probeta.
- $t$ : Tiempo.
- $V_{ii}$ : Volumen del hidrómetro.

Dado el peso volumétrico y de la suspensión en un instante  $t$ , después de iniciada la sedimentación, se calcula la fracción  $N$  de los sólidos cuyos diámetros equivalentes son menor que el valor deducido por la ley de Stokes, con la expresión siguiente:



$$N = \frac{S_s}{S_s - 1} \frac{V}{W} (\gamma - \gamma_w)$$

O sea:

$$N = \frac{\text{Sólidos de diámetro menor que } d}{\text{Total de sólidos}}$$

Donde

$S$  es la densidad media de las partículas;

$V$  el volumen total de suspensión;

$W$  el peso inicial de los sólidos

$\gamma_w$  el peso volumétrico del agua.

Para poder aplicar la fórmula que da el valor de  $N$ , es necesario convertir previamente la escala del hidrómetro de g./lt. a pesos volumétricos. Esta operación es simultánea con la corrección que es indispensable efectuar a la escala del hidrómetro, como se verá claramente en el primer paso de la calibración de éste.

Por otra parte, el diámetro correspondiente al valor  $N$  para el tiempo  $t$ , se estima considerando que la altura de caída de la partícula de mayor tamaño es igual a la distancia entre la superficie libre del líquido y el centro de carena del hidrómetro; en la práctica, en lugar de este centro se toma como referencia el centro del volumen del bulbo.

Con ese fin, se miden previamente las distancias entre las diversas lecturas de la escala del hidrómetro al centro del volumen, las que deben corregirse por inmersión, ya que ésta eleva la superficie libre de la suspensión.

Además, las lecturas del hidrómetro deben corregirse por menisco, temperatura y defloculante.

#### Prueba del hidrómetro

##### Equipo:

- \* Hidrómetro calibrado y graduado en g./lt. de 0 a 60 con divisiones de gramo en gramo.
- \* Probeta de 1,000 cm<sup>3</sup> Bouyoucos para esta prueba.
- \* Probeta de 1,000 cm<sup>3</sup> ordinaria.
- \* Cronómetro para tomar tiempos de reposo. Termómetro graduado en 0.1°C.
- \* Balanza Cenco de 3 barras o eléctrica de 0.01 g. de aproximación.
- \* Agitadora eléctrica.
- \* Vaso de precipitado.

- ♦ Defloculante.

#### Procedimiento

- 1.-Del material seco pasado por la malla Núm. 200, se pesan 50 o 100 g. y se colocan en un vaso de precipitado, agregando defloculante (20 cm.3 de solución) y el agua necesaria hasta que todo el material quede sumergido, dejándolo reposar durante 18 horas mínimo.
- 2.-El contenido del vaso de precipitado se vierte en el vaso de la agitadora eléctrica, enjuagándolo para evitar pérdidas de material y después se pone a funcionar el aparato de 10 a 20 minutos.
- 3.-Se vierte la suspensión, en una probeta Bouyoucos, enjuagando bien el vaso. Se agrega agua hasta la marca de aforo (1,000 cm<sup>3</sup>).
- 4.-Se agita la probeta en posición horizontal durante un minuto, tapando con la palma de la mano la boca de la misma.
- 5.-Inmediatamente se asienta la probeta en la mesa, se pone en marcha el cronómetro y poco a poco se sumerge el hidrómetro hasta que comience a flotar. Se deja éste dentro de la suspensión los dos primeros minutos, tomando lecturas a los 20, 40, 80 y 120 seg. Las lecturas deben registrarse
- 6.-Retírese el hidrómetro, sumérgase en una probeta con agua limpia y tómesese la temperatura de la suspensión.
- 7.- Se vuelven a hacer lecturas a los 5, 10, 20, 25, 30 minutos, 1, 1.5, 2, 3, 24 y 48 horas. El hidrómetro se introduce en la suspensión, aproximadamente 20 segundos antes de hacer cada una de las lecturas, registrando la temperatura de ésta después de cada operación.

#### Cálculo

Para calcular el porcentaje y tamaño de las partículas que forman la fracción de material lavado y tamizado por la malla Núm. 200 (0.074 mm.), se procede de la siguiente manera:

- 1.-Con las lecturas del hidrómetro hechas en distintos tiempos y sus respectivas temperaturas registradas, se procede a calcular el peso de los sólidos en suspensión, de acuerdo con la clave del nomograma. Los valores que se obtengan en el eje W<sub>s</sub> de dicho nomograma se debe anotar y representa R + MS<sub>s</sub>(S<sub>s</sub> - 1).
- 2.-Con estos valores, se procede al cálculo de los porcentajes acumulativos que pasan la malla Núm. 200 (0.074 mm.), empleando la siguiente fórmula:

$$W\% = \frac{100}{W_s} R + \frac{MS_s}{S_s - 1}$$



Nótese que si los sólidos empleados (W<sub>s</sub>), son 50 g. secos, basta multiplicar por dos a R + MS (S<sub>s</sub> - 1) para obtener estos porcentajes.

- 3.- Para obtener los porcentajes acumulativos pasa 4, se multiplica el porcentaje acumulativo pasa 200 del paso 2 por el porcentaje acumulativo pasa 4 de la malla Núm. 200 (0.074 mm.) del análisis mecánico.
  - 4.-Para obtener los porcentajes acumulativos totales, se multiplica el porcentaje acumulativo pasa 200 del paso 2 por el porcentaje acumulativo total de la malla Núm. 200 (0.074 mm.) del análisis mecánico.
  - 5.-El diámetro de las partículas, correspondientes a cada porcentaje, se estima por medio del diagrama de la ley de Stokes, de A. Casagrande, en el que se entra con la densidad del suelo, la temperatura, las lecturas del hidrómetro y los tiempos correspondientes.
  - 6.- Con los valores asentados del registro del análisis granulométrico, se construye la gráfica granulométrica, colocando en las abscisas los porcentajes que pasan y en las ordenadas los diámetros respectivos.
- Cuando el material contiene grava comprendida entre la malla Núm. 4 (4.69 mm.) y la de 76.2 mm. (3"), se construyen dos curvas en la misma lámina, una tomando los porcentajes totales y la otra los porcentajes pasa 4.

La clasificación del material es la del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, adoptada por el Cuerpo de Ingenieros y el U.S.B.R.

Deben anotarse los porcentajes clasificados, con lo cual es posible identificar el tipo del material. Cuando el material es arenoso, se puede calcular el coeficiente de uniformidad (C<sub>u</sub>), en la forma siguiente:

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

Donde

C<sub>u</sub>, es el coeficiente de uniformidad

D<sub>60</sub> es el diámetro correspondiente al 60% del material que pasa

D<sub>10</sub> es el 10% del material que pasa

El coeficiente de curvatura (C<sub>c</sub>) está dado por la fórmula:

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



### III DENSIDAD

Se define como la relación entre el peso de los sólidos y el peso del volumen de agua que desalojan.

Tratándose de gravas o piedras, se determina la densidad con relación al agua limpia a la temperatura ambiente, estando el material saturado.

El valor de la densidad, que queda expresado por un número abstracto, además de servir para fines de clasificación, interviene en la mayor parte de los cálculos de Mecánica de Suelos.

Para su determinación se hace uso de matraces calibrados a distintas temperaturas. La densidad de los suelos varía comúnmente entre los siguientes valores:

Cenizas volcánicas	2.20 a 2.50
Suelos orgánicos	2.50 a 2.65
Arenas y gravas	2.65 a 2.67
Limos inorgánicos y guijarros arcillosos	2.67 a 2.72
Arcillas poco plásticas y medianamente plásticas	2.72 a 2.78
Arcillas medianamente plásticas y muy plásticas	2.78 a 2.84
Arcillas expansivas	2.84 a 2.88

#### Equipo

- Balanza de torsión o eléctrica de 1 kg. aproximadamente de apandad, sensible a 0.1 g.
- Balanza Cenco de 3 brazos, de 110 g. de capacidad, sensible a 0.01 g o eléctrica de características similares.
- Estufa
- Horno de secado a temperatura constante de 110C.
- Termómetro de 0 a 500C, graduado en 0.1 de grado.
- Vaso de precipitado de 400 cm<sup>3</sup>.
- Probeta graduada de 500 cm<sup>3</sup>.
- Cápsulas de porcelana o vidrio refractario.
- Matraces calibrados de 500 cm<sup>3</sup>.
- Equipo para la calibración del matraz.
- Termómetro de 0 a 50° C (graduado en décimos de grado).
- Pipeta de 5 cm<sup>3</sup>.
- Alcohol de 96°.
- Éter sulfúrico.
- Balanza de torsión de 1 kg. de capacidad y sensibilidad de 0.1 g. con marco de pesas calibrado (o eléctrica de capacidad similar).
- Piseta con agua destilada.
- Solución para disolver grasas: mezcla crómica.

a) Calibración del matraz.



El peso del agua que un matraz puede contener varía con la temperatura; esto se debe, por una parte, a que los cambios de temperatura provocan variaciones en el volumen del recipiente; y, por otra parte, se modifica la densidad del agua.

Es conveniente formar, para cada uno de los matraces, una gráfica de calibración, o sea, una curva que tenga, por ordenadas, los pesos de matraz con agua hasta la marca de aforo y, como abscisas, las temperaturas correspondientes.

Teniendo esta gráfica, se puede conocer rápidamente el dato requerido para el ensayo.

#### Procedimiento

1.-Con amoniaco o alguna solución que disuelva las grasas, se limpia el matraz.\* A veces es necesario dejar el matraz lleno con la solución durante varias horas. En seguida se enjuaga el matraz varias veces y se deja escurrir colocándolo con la boca hacia abajo. Después se lava con alcohol, se deja escurrir y luego se lava con éter;\*\* los vapores del éter se eliminan colocando el matraz con la boca hacia abajo durante unos 15 o 20 minutos.

\* Una de las mejores soluciones para quitar la grasa de los matraces es la mezcla crómica, que tiene la ventaja de poder recuperarse después de cada lavado y usarse varias veces. Se prepara disolviendo en caliente 60 g. de bicromato de potasio comercial en 300 cm<sup>3</sup> de agua y, una vez fría la solución, se agrega muy lentamente, sin dejar de agitar, 460 cm.3 de ácido sulfúrico comercial. Debe procederse con Cuidado, tratando de escurrir el ácido sulfúrico por las paredes del recipiente donde se esté preparando la mezcla, pues la reacción que se provoca al contacto con la solución es fuerte y, si no se toman las precauciones debidas, puede resultar peligrosa.

\*\* Siendo el éter altamente inflamable, debe operarse con cuidado, evitando la cercanía de cualquier flama.

2.-Se llena el matraz con agua destilada hasta la marca de aforo y se pone a hervir de 5 a 10 minutos en baño maría, a fin de eliminar el aire.

3.-Se retira el matraz del baño maría y se toma la temperatura al 0.1 de grado introduciendo el termómetro hasta el centro del matraz. Si la temperatura es elevada, deben promediarse las lecturas del termómetro en tres puntos de la masa de agua.

4.-Con la ayuda de una pipeta, se hace coincidir perfectamente la parte inferior del menisco con la marca; en seguida se limpia exteriormente el matraz y se pesa al 0.1 g. en la balanza de torsión.

5.-Se deja enfriar el matraz, hasta que la temperatura del agua baje unos 5°, se afora, se toma la temperatura al 0.1° y se vuelve a pesar. Esta operación se repite de 6 a 8 veces, dejando enfriar cada vez el matraz. Las temperaturas y los pesos correspondientes se deben de registrar.

6.- Con los datos de temperatura y los pesos del matraz más agua hasta la marca de aforo, se construye una gráfica en papel milimétrico.

*Procedimiento.*

1.-De la muestra preparada, que ha pasado por la malla Núm.4 (4.69 mm.), se toman unos 200 g. procurando que la muestra sea representativa; se colocan en una cápsula de porcelana o vidrio refractario.

El material debe triturarse en un mortero hasta que adquiera una finura tal que pueda pasar íntegramente por la malla Núm. 40 (0.420 mm.), dejándolo secar en el horno a temperatura constante de 110°C, durante 18 horas mínimo. Transcurrido este tiempo, se retira la cápsula del horno, se deja enfriar dentro de un desecador, para que no absorba agua, y se toma una cantidad aproximada a 60 g.

2.-Un matraz limpio de 500 cm<sup>3</sup> se pesa conteniendo alrededor de 100 cm<sup>3</sup> de agua destilada. El peso obtenido al 0.1 g. se anota como W<sub>m</sub>.

3.-El material seco se vacía en el matraz con agua; esta operación se facilita mediante un embudo de vidrio.

Se vuelve a pesar, anotando el peso como W<sub>ms</sub> en el registro de cálculos. Después de haberse pesado el matraz se desprende el material que quedó adherido al interior del cuello de éste, utilizando para el caso una piseta con agua destilada.

4.-Se pone el matraz en baño maría a fin de expulsar el aire contenido en el material.

Tratándose de materiales arenosos, generalmente son suficientes 10 minutos de hervido en el baño maría; se necesitarán hasta 30 minutos, para materiales arcillosos.

El líquido que va a transmitir el calor puede ser cualquiera que tenga su punto de ebullición mayor a 100°C; generalmente se usa la glicerina.

Si se cuenta con sistema de vacío, ya sea con trompa de vacío o bomba de vacío su uso mejora la operación pues la suspensión hierve a una temperatura más baja al disminuir la presión.

5.-Se saca el matraz del baño maría. Se lava exteriormente para eliminar la glicerina o grasas y se deja enfriar; una vez que adquiere la temperatura ambiente, se agrega agua destilada hasta llenarlo cerca de la marca de aforo, se deja que la temperatura sea uniforme y se mide al 0.10, introduciendo el termómetro hasta el centro de la suspensión.

La temperatura obtenida se anota en el registro de cálculos.

6.-Después de tomar la temperatura y con la ayuda de una Pipeta, debe agregarse agua destilada en cantidad tal que la parte inferior del menisco coincida con la marca de aforo del matraz.

7.-Es necesario eliminar el agua que quede adherida al interior del cuello del matraz, arriba de la marca de aforo, para lo cual se introduce un rollito de papel secante o absorbente.



8.-Después de aforado y secado, se pesa el matraz al 0.1 g, anotando el peso como W<sub>mws</sub> en el registro.

Las operaciones 6 y 7 deben realizarse rápidamente, para que haya correspondencia entre la temperatura media de la suspensión en el matraz y su peso W<sub>mws</sub>.

9.- El peso de los sólidos W<sub>s</sub> es la diferencia entre los valores anotados en los renglones W<sub>ms</sub> y W<sub>m</sub>.

10.- De la curva de calibración del matraz, se obtiene el peso del mismo, con agua destilada hasta la marca de aforo y a la temperatura t del ensayo W<sub>mw</sub>. La expresión W<sub>s</sub> + W<sub>mw</sub> - W<sub>mws</sub> representa el peso del volumen de agua desalojado por los sólidos a la temperatura de la prueba.

Por lo tanto, la densidad será igual a:

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} - W_{mws}}$$

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

Es muy importante que antes de efectuar la prueba de densidad se limpie perfectamente el matraz con agua, jabón y un escobillón que pueda introducirse en éste, enjuagándolo al final con agua destilada.

c) Densidad de gravas.

*Procedimiento*

1.-En una charola con agua se dejan durante unas 24 horas las piedras o gravas para que se saturen. Transcurrido este tiempo, se sacan del agua y se secan superficialmente.

2.-Se pesan las piedras ya saturadas en una balanza que aproxime al 0.1 g. y se anota como Peso grava húmeda

3.-Para determinar el volumen de las piedras o gravas, se introducen en una probeta graduada, que contenga una cantidad conocida de agua. La diferencia de las dos lecturas en la probeta es el volumen en cm<sup>3</sup> de las piedras o gravas. Anótese como Volumen desalojado.

Cuando el material es abundante o las piedras son muy grandes, en lugar de utilizar una probeta para medir el volumen desalojado, se utiliza un picnómetro.

4.-Procurando no perder material se trasvasa y se introduce en el horno para que se seque, después se pesa y se anota como Peso grava seco, teniendo presente descontar la tara.

5.-Para obtener el por ciento de absorción, se resta el peso seco del peso húmedo (que da la cantidad de agua) y se divide entre el peso seco, multiplicando por cien.

$$\% \text{ de abs} = \frac{\text{Peso de grava húmeda} - \text{Peso de grava seca}}{\text{Peso de grava seca}} \cdot 100$$

6.-El valor de la densidad de masa ( $S_m$ ) se obtiene de dividir el peso de la grava seca entre el volumen desalojado.

$$S_m = \frac{\text{Peso de grava seca}}{\text{Volumen Desalojado}}$$

7.-El valor de la densidad de sólidos ( $S_s$ ) se obtiene de dividir el peso de la grava seca entre el volumen desalojado menos el volumen de absorción.

$$S_m = \frac{\text{Peso de grava seca}}{\text{Volumen Desalojado} - \text{Volumen de absorción}}$$



#### IV COMPACTACIÓN

Se entiende por compactación todo proceso que aumente el peso volumétrico de un material granular. En general, es conveniente compactar un suelo para incrementar su resistencia al esfuerzo cortante, reducir su compresibilidad y hacerlo más impermeable.

El acomodo de las partículas, en un suelo que se ha tratado de mejorar, no sólo depende de las características del dispositivo que se usó para compactarlo, sino fundamentalmente de la humedad que tiene el material. Si las partículas están secas, la fricción intergranular opone una resistencia mayor al desplazamiento relativo entre ellas, que si se encuentran lubricadas por una película de agua; por el contrario, si la masa tiene una humedad elevada, el agua llena vacíos que podrían ser ocupados por partículas en un arreglo más denso. Esto último es cierto en suelos que tienen un alto porcentaje de finos y no en las arenas gruesas y gravas. Por lo tanto, dado un proceso de compactación, para cada material existe un contenido de agua con el que se obtiene el máximo peso volumétrico.

La siguiente prueba es una de las aceptadas para determinar las condiciones óptimas de compactación de una tierra en el laboratorio; con objeto de que esta prueba proporcione valores similares en cualquier sitio que se efectúe, se ha diseñado una base estándar, la cual, según las investigaciones hechas para tal efecto, ha demostrado gran similitud en los resultados obtenidos para cualquier tipo de piso donde se coloque; sin embargo se recomienda que ésta se apoye en un piso de cemento. La prueba nos proporciona valores que en general corresponden a los pesos volumétricos máximos que pueden obtenerse en el campo, trabajando con los equipos usuales (rodillos lisos y pata de cabra), siempre que, en cada caso se ajuste empíricamente al espesor de la capa de material, el número de pasadas del equipo de compactación.

La bondad del proceso seguido en el campo se mide por el grado de compactación, o sea la relación entre el peso volumétrico seco en el terraplén y el óptimo determinado en la prueba Proctor.

##### Equipo

- Cilindro Proctor de compactación de 10.2 cm. de diámetro interior y 12.3 cm. de altura.
- Extensión del cilindro de igual diámetro interior y 6.5 cm. de altura
- Pisón cilíndrico, de 5 cm. de diámetro en la base y un peso de 2.75 kg.
- Guía de lámina galvanizada, de 48 cm. de longitud, con un escalón a 45.7 cm. (18") para dar la caída libre del martillo.
- Base estándar de 325 kg. de peso
- Charola de lámina galvanizada, de 50 x 50 x 10 cm.
- Juego de espátulas de acero y enrasador.
- Pieza prismática, de madera, de 20 x 5 ) < 5 cm., para desmoronar terrones.
- Probeta graduada, de 500 cm<sup>3</sup>.
- Horno a temperatura constante de 110°C. (Fig.
- Báscula Fairbanks, con capacidad de 120 kg. en la plataforma y 12 kg. en el platillo; sensible a 5 g. (de preferencia báscula de 15 kg. y sensible a 2 g.)

- ♦ Balanza de torsión o balanza eléctrica, con capacidad de kg. y sensibilidad de 0.1 g.
- ♦ Cápsulas de porcelana o material refractario previamente numeradas y taradas.
- ♦ Cucharón de lámina galvanizada.

#### Procedimiento

- 1.-De la muestra ya preparada y que ha pasado por la malla No.4, se toman aproximadamente 2.5 kg., se ponen en la charola y se dejan secar al aire en caso de que esté muy húmeda.
- 2.-Se desmoronan los terrenos de material, utilizando la pieza de madera de sección cuadrada.
- 3.-Se esparce agua en cantidad tal que la humedad resulte un poco menor de 10% y si el material es arenoso es conveniente ponerle una humedad menor. Esta operación también puede efectuarse empleando un atomizador (bomba para insecticida).
- 4.-Se revuelve perfectamente el material, tratando que el agua agregada se distribuya uniformemente.
- 5.-Usando el cucharón, se vacía en el cilindro Proctor, previamente armado con su extensión, material suficiente para obtener una capa floja de unos 8 cm. de espesor.
- 6.-Esta capa se compacta mediante 20 golpes de pisón, procurando repartirlo en toda su superficie y usando la guía metálica para que a altura de caída sea la misma. Los golpes de pisón se dan levantando éste hasta el nivel superior de la guía y dejándolo caer libremente.
- 7.-Se vuelve a vaciar material en el cilindro para tener una segunda capa que, agregada a la primera, dé una altura total de unos 11 o 12 cm., compactándola del mismo modo que la primera.
- 8.-En idéntica forma, se procede con la tercera capa, procurando que una vez compactado el material, la superficie está 1 o 2 cm., arriba del ensamble en la extensión.
- 9.-Al terminar la compactación de las tres capas, con una espátula de cuchillo se recorre el perímetro interior de la extensión para despegar el material y se quita cuidadosamente la extensión, enrasando la muestra al nivel superior del cilindro y rebanando el material sobrante con una espátula de cuchillo o bien con un enrasador.
- 10.-Se limpia exteriormente el cilindro y se pesa con la muestra compactada en el platillo de la báscula, aproximando la lectura hasta los 5 g. El peso obtenido se anota como Peso cilindro + tierra.



11.-En una cápsula de porcelana o vidrio refractario, previamente numerada y tarada, se toma una porción de la muestra compactada, aproximadamente 100 g., y se pesa al 0.1 de g. en la balanza de torsión, anotando este valor en la columna tara + muestra húmeda.

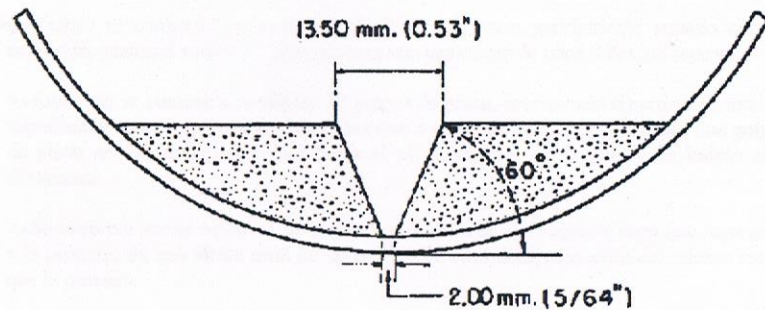
12.-Se desarma el cilindro Proctor con objeto de extraer fácilmente el material, devolviéndolo a la charola.

13.-El material se desmenuza, picándolo con una espátula de abanico y cuando está bien desmoronado se le agrega agua en cantidad suficiente para aumentar el contenido de humedad de un 2% a un 5% aproximadamente, dependiendo del tipo de material. Se repiten todos los pasos del 4 al 12, obteniendo así un nuevo punto de la gráfica humedad contra peso volumétrico seco.

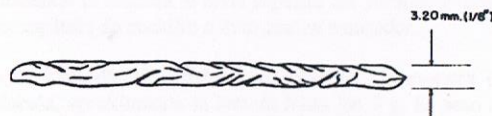
Para poder definir las condiciones óptimas del material, es necesario efectuar cuatro o cinco veces los pasos del 4 al 12, incrementando en cada ensayo el contenido de agua.

## V DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG

Las propiedades de un suelo formado por partículas finamente divididas, como una arcilla no estructurada, dependen en gran parte de la humedad. El agua forma una película alrededor de los granos y su espesor puede ser determinante de comportamientos diferentes del material. Cuando el contenido de agua es muy elevado, en realidad se tiene una suspensión muy concentrada, sin resistencia estática al esfuerzo Cortante; al perder agua, va aumentando esa resistencia hasta alcanzar un estado plástico en que el material es fácilmente moldeable; si el secado continua, el suelo llega a adquirir las características de un sólido, pudiendo resistir esfuerzos de compresión y tensión considerables. Arbitrariamente, A. Atterberg marcó las fronteras de los cuatro estados en que pueden presentarse los materiales granulares muy finos, fijando los límites siguientes: líquido, plástico y de contracción. El primero es la frontera entre el estado líquido y el plástico; el segundo entre el estado plástico y el semisólido; y el tercero separa el estado semisólido del sólido. A estos límites se les llama límites de consistencia. El límite líquido  $L_L$  lo fija el contenido de agua (expresado en porcentaje del peso seco), que debe tener un suelo remoldeado para que una muestra del mismo, en que se haya practicado una ranura de dimensiones estándar, al someterla al impacto de 25 golpes bien definidos, se cierre sin resbalar en su apoyo.



El límite plástico  $L_P$  lo fija el contenido de agua con el que comienza a agrietarse un rollo formado con el suelo, de aproximadamente 3.2 mm. de diámetro, al rodarlo con la mano sobre una superficie lisa, no absorbente que puede ser una placa de vidrio.



El límite de contracción  $L_C$  es el contenido de agua que saturaría a un suelo contraído por secamiento de evaporación. La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico se llama índice de plasticidad, y es una medida de la plasticidad del suelo. Se define el índice de contracción por la diferencia entre los límites plástico y de contracción.

En Mecánica de Suelos, y en particular en los estudios de materiales para la construcción del terraplén de una cortina, los límites de consistencia son de gran ayuda para clasificar la fracción fina de un Suelo; así como en el manejo de la explotación de préstamos, cuando éstos están formados por materiales esencialmente arcillosos o limosos.

### Equipo

- Dispositivo de A. Casagrande para determinar el límite líquido, incluyendo la solera plana de un centímetro de espesor y el ranurador plano.
- Espátulas, cápsula de porcelana, malla Núm. 40 (0.420 mm.), vidrios de reloj, mortero y piseta.
- Horno a temperatura constante de 105°C.
- Balanza Cenco de 3 brazos y aproximación de 0.01 g o balanza eléctrica de características similares.
- Mercurio, cápsulas de Petri, charola de plástico con recipiente para determinar volúmenes, balanza de torsión de 1kg., con marco de pesas, piseta, cápsulas de porcelana, espátula y brocha.
- Frascos de vidrio de 100 a 200 cm<sup>3</sup>.

### Preparación de la muestra.

Las pruebas de consistencia se hacen solamente con la fracción de suelo que pasa por la malla Núm. 40 (0.420 mm.).

A continuación se describen dos procesos de preparación de la muestra.

Para determinar cuál proceso conviene, se seca al horno una muestra húmeda de material y se presiona con los dedos. Si se desmorona fácilmente, se usa el método de separación en seco (indica que el material es areno-limoso o limoso). En cambio, si la muestra ofrece considerable resistencia y los granos no pueden separarse, se requiere hacer la preparación con ayuda del agua (indica que el material es arcilloso).

#### a) Método Seco.

- 1.- Del material que pasa la malla Núm. 4 (4.69 mm.), se desmenuzan 150 g. en un mortero, teniendo cuidado de no llegar a romper los granos.
- 2.- Se pasa el material a través de la malla Núm. 40 (0.420 mm.), desechando el que quede retenido.
- 3.- Se pone en una cápsula el material que ha pasado por dicha malla.
- 4.- Se agrega agua y, con una espátula de cuchillo, se mezcla perfectamente hasta obtener una pasta suave y espesa.

5.-Se guarda la muestra humedecida en un frasco durante 24 horas mínimo para que la humedad se distribuya uniformemente en todos los granos del suelo (Fig. 139); esta operación debe repetirse con diferentes grados de humedad, incluyendo una que esté cerca del límite plástico.

b) Método húmedo. Cuando convenga aplicar este método, se sigue el mismo procedimiento que se usa en el análisis granulométrico por vía húmeda, con la diferencia que, en vez de utilizar la malla Núm. 200 (0.074 mm.), se utiliza la Núm. 40 (0.420 mm.) y el material que se recoge no se introduce en el horno, sino que se deja evaporar hasta que tome la consistencia de una pasta suave, y en la misma forma que se explicó en el 5 paso del método seco, se guardan en frascos las muestras, incluyendo la porción que corresponde al límite plástico.

#### Determinación del límite líquido.(L<sub>L</sub>)

1.-La copa de Casagrande antes de usarse, debe ser ajustada para que ésta tenga una altura de caída de 1 cm., exactamente. Esta distancia se mide con una solera que tiene ese espesor. En la copa del aparato se marca el centro de la huella que se forma al golpear con la base.

2.-Se da vuelta a la manija hasta que la copa se eleve a su mayor altura y tomando como punto de referencia el centro de percusión, se verifica la distancia entre ésta y la base; Cuando la copa esté tangente a la solera en el centro de percusión, se fija con los tornillos para evitar que se modifique esta altura.

3.-Del material que se preparó y guardó en frascos durante 24 horas se pone en la copa del aparato una cantidad de 50 g., aproximadamente; se vuelve a mezclar hasta que la muestra quede homogénea; con una espátula se dispone el material de modo que, siendo la superficie superior plana (evítese formar taludes), su espesor máximo sea del orden de 1 cm.

4.-Se pone la punta del ranurador en la parte superior y al centro de la muestra, colocando la herramienta perpendicular a la superficie de la copa.

5.-Se hace una ranura en el centro de la muestra, inclinando el ranurador o la cuchilla de manera que permanezca perpendicular a la superficie inferior de la copa.

Para arcillas con poco o ningún contenido de arena, hágase la ranura con un solo movimiento suave y continuo. Para arcillas arenosas, limos con poca plasticidad y algunos suelos orgánicos, el ranurador no puede correr a través de la pasta sin rasgar los bordes de la ranura. Para estos suelos, se corta la ranura con una espátula y se verifican las dimensiones con el ranurador plano.

Se limpia el ranurador con un trapo húmedo antes de que se seque el material.



6.-Después de asegurarse de que la copa y la base están limpias y secas, se da vuelta a la manija uniformemente a razón de dos golpes por segundo, contando el número de golpes requerido hasta que se cierre el fondo de la ranura en una distancia de 1 cm.

7.-Con la espátula se mezcla el material y se repiten las operaciones indicadas en 3, 4, 5 y 6. Si el número de golpes coincide con la anterior determinación, o su diferencia es de 1 golpe, se anota el resultado en el registro respectivo promediando en el segundo caso. En caso de que la diferencia sea mayor de 1 golpe, se repite el proceso hasta lograr una coincidencia en dos intentos sucesivos.

8.- Se ponen aproximadamente 30 g. de la porción de la muestra que está próxima a la ranura, en un vidrio de reloj.

9.-Se engrapan los vidrios.

10.-Se pesa con una aproximación de 0.01 g., el valor se anota como tara + muestra húmeda y en el mismo renglón se registra el número de la tara Y su peso correspondiente.

11.-Se repiten los pasos del 3 al 10 tomando muestras de los diferentes frascos, para ir variando la consistencia del material. Es recomendable contar con cuatro determinaciones procurando que estén comprendidas entre 5 y 40 golpes.

12.-Todos los vidrios de reloj conteniendo las muestras tomadas, se introducen en el horno a 110°C, durante 18 horas mínimo, para que se sequen. Una vez secas se sacan del horno y se ponen dentro de un desecador para que se enfrien; después se pesan y el valor es tara + muestra seca.

13.-Se siguen los pasos necesarios para obtener la cantidad de agua en %, correspondiente a cada número de golpes y se construye la curva número de golpes contra humedad en % en una gráfica semilogarítmica.

El límite líquido se encuentra donde el contenido de agua en la curva corresponda a 25 golpes. (L<sub>L</sub>)

Un método optativo para determinar el límite líquido con un solo punto \* dentro de cierto rango de número de golpes (de 20 a 30 únicamente) es el de emplear la fórmula empírica siguiente:

$$L_L = \frac{N}{25}^{0.12}$$

en donde:

LL: Límite líquido.

ω<sub>N</sub>: Humedad con N número de golpes en %

N: Número de golpes.

Con objeto de facilitar el empleo de esta fórmula en la tabla adjunta se dan los valores correspondientes a  $(N/25)^{0.12}$  para cualquier número de golpes entre 20 y 30.

N	(N/25) 0.12
20	0.974
21	0.979
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

Determinación del límite plástico.

- 1.-Se toma aproximadamente la mitad de la muestra separada en el frasco, según se indicó en la preparación de la muestra, procurando que tenga una humedad uniforme cercana a la humedad óptima de la prueba Proctor; se rueda con la mano sobre una superficie limpia y lisa no absorbente como una placa de vidrio, hasta formar un cilindro de 3.2 mm. de diámetro y de 15 cm. aproximadamente de largo.
- 2.-Se amasa la tira y se vuelve a rodar, repitiendo la operación tantas veces como se necesite para reducir, gradualmente, la humedad por evaporación, hasta que el cilindro se empiece a endurecer.
- 3.-El límite plástico se alcanza cuando el cilindro se agrieta al ser reducido aproximadamente a 3.2 mm de diámetro.
- 4.-Inmediatamente se divide el cilindro y se ponen los pedazos de dos vidrios de reloj engrapándolos con su broche.
- 5.-Se pesa en la balanza de 0.01 g., y se registra este valor como tara + muestra húmeda correspondiente al límite plástico, asimismo se anota el número de la tara y su peso, respectivamente.
- 6.-Con la otra mitad de la muestra se repiten los pasos del 1 al 5 para comprobar la determinación anterior.
- 7.-Se introducen las muestras tomadas en el horno durante 18 horas mínimo para su evaporación, se sacan y se dejan enfriar dentro de un desecador, se pesan, anotando el valor como tara + muestra seca.
- 8.-Con los datos anteriores se calcula el contenido de agua en %. Si la diferencia de los % no es mayor de 2 se promedian, y en caso contrario se repite la determinación. El promedio es el valor en % del Límite Plástico.  $L_p$ .

Determinación del límite de contracción.



El límite de contracción puede determinarse gráficamente por medio de una prueba de laboratorio, o calcularse analíticamente con la fórmula siguiente:

$$L_c = \omega_c = \omega_i \frac{(V_i - V_f)}{W_s} * 100$$

En donde:

- $L_c$ : límite de contracción en %.
- $\omega_i$ : porcentaje de humedad del suelo antes de contraerse.
- $V_i$ : volumen inicial de la pastilla de suelo.
- $V_f$ : volumen final de la pastilla (suelo seco).
- $W_s$ : peso de sólidos.

A la relación  $R = W_s/V_f$  se le llama relación de contracción y es igual, en valor, al peso volumétrico seco máximo que puede alcanzar un suelo al contraerse.

Se define como cambio volumétrico  $C_v$  al cambio de volumen, en porcentaje del volumen referido al material seco, que ocurre cuando el contenido de humedad de la muestra se reduce de la humedad de campo (H. C.), hasta el límite de contracción. Se obtiene mediante la fórmula:

$$C_v = (H.C. - L_c)R$$

Contracción lineal de un suelo, a partir de un contenido de humedad dado, es la disminución de una de sus dimensiones, expresada como porcentaje de la dimensión original.

La contracción lineal, cuando el contenido de humedad se reduce del (H. C.) al límite de contracción, se calcula con la fórmula:

$$L_{c.l} = 100 \sqrt[3]{\frac{100}{C_v + 100}}$$

Procedimiento

- 1.-Se toman 200 g de material seco que haya pasado por la malla Núm. 4 (4.69 mm.).
- 2.-En un mortero se desmoronan los grumos, procurando no romper los granos de arena y se criba el material en la malla Núm. 40 (0.420 mm.) hasta obtener aproximadamente 100 g de material seleccionado.
- 3.-En la cápsula de 16 cm se prepara una pasta de consistencia un poco más fluida que la que se define en el límite líquido.
- 4.-Se llena el Petri con la pasta preparada, golpeando el conjunto sobre un cojín protector especial, con el objeto de remover las posibles burbujas de aire.

- 5.-Una vez que se han removido todas las burbujas y que se ha llenado totalmente el Petri, se enrasa utilizando una espátula de cuchillo, y se limpia perfectamente.
  - 6.-Se pesa el Petri con el material húmedo, anotando el dato y de igual forma se registra el volumen.
  - 7.-Se pone a secar el material del Petri en el medio ambiente durante un lapso de 12 a 24 horas. Se pesa y se anota el dato.
  - 8.-Se llena un recipiente hasta derramar, con Hg, y se enrasa. Para enrasar se coloca la placa circular perforada sobre la superficie del Hg, y por medio del dispositivo especial de lucita se presiona hacia abajo forzando el excedente de Hg, a salir del cilindro. El Hg, que se derrama resbala por la base y se recoge en la parte inferior de ésta en una cápsula protegida con una cubierta especial de lucita que impide pérdidas de Hg. Es necesario limpiar perfectamente la base y el recipiente, para lo cual se utiliza una brocha de cerda fina. (Hay que tomar precauciones al manejar el Hg por la gran toxicidad de sus vapores.)
  - 9.-En la parte inferior del dispositivo de lucita se coloca una nueva cápsula limpia y tarada en el lugar de la anterior.
  - 10.-Se coloca el Petri, protegido en la placa circular perforada, sobre la superficie del Hg, y se sumerge el conjunto lentamente con movimiento de rotación por medio del dispositivo especial de lucita. Es necesario mantener sumergido el conjunto mientras se limpia perfectamente el recipiente y la base. En esta operación el Hg desalojado representa el volumen del Petri más la muestra contraída.
  - 11.- Se pesa la cápsula con Hg anotando el dato.
  - 12.- Es necesario quitar en lo posible el Hg que ha quedado en los espacios originados por la contracción del material. Esta operación se efectúa inclinando el Petri y golpeándolo suavemente. Hecho lo cual se pesa el Petri anotando el dato.
  - 13.- Repítanse los incisos del 7 al 13 inclusive, en tres ocasiones.
  - 14.-Se mete el Petri al horno 105°C, hasta obtener peso constante.
  - 15.-Repítanse los incisos del 9 al 13 inclusive.
- El método de cálculo se efectúa en la forma siguiente:
- 1.- Al peso del petri + muestra húmeda se les resta el peso, ya tabulado, del Petri en cuestión a fin de obtener el valor de el peso de la muestra húmeda.
  - 2.- Al peso desalojado por el Hg en la muestra húmeda + el petri mas la cápsula, se le resta el valor del peso de la cápsula mas el Hg desalojado por petri, para obtener el valor del Hg desalojado por la muestra húmeda.



- 3.-El volumen inicial de la muestra es el correspondiente al Petri calibrado, ya que la muestra al iniciar la prueba ocupa todo su volumen; en este caso el volumen inicial se anota como volumen de muestra.
  - 4.-Los volúmenes correspondientes a la muestra a medida que avanza la prueba, se obtienen de dividir los pesos del Hg desalojado por la muestra húmeda, entre el peso volumétrico de éste (13.6 gr/cm<sup>3</sup>) y desde luego se anotan también como volumen de la muestra correspondiente.
  - 5.-Los valores del peso volumétrico húmedo de  $\gamma_H$  son el resultado de dividir los valores del peso de la muestra húmeda entre los correspondientes del volumen de la muestra y multiplicados por mil, para que las unidades estén en kg./m<sup>3</sup>.
  - 6.-El último valor del peso de la muestra húmeda, representa el peso de la muestra seca. Así pues, este valor restado a cada uno de los valores del peso de la muestra húmeda, nos da los distintos pesos de agua que corresponden a cada muestra durante las distintas fases de la prueba, y éstos se anotan como peso de agua.
  - 7.- El porcentaje de agua en función del peso de la muestra seca, se obtiene, dividiendo cada uno de los valores del peso del agua entre el peso de la muestra seca. Este cociente se multiplica por 100 para obtener el porcentaje de humedad.
  - 8.-El peso volumétrico seco, se obtiene al dividir el peso de la muestra seca entre cada uno de los pesos de cada muestra y multiplicando por mil.
  - 9.-El volumen húmedo menos el volumen seco, se obtiene restando el volumen seco de la última toma, el volumen seco anterior, y así sucesivamente.
  - 10.-El porcentaje de volumen se obtiene al dividir los valores de volumen húmedo menos volumen seco, entre el peso de la muestra seca y multiplicarse por 100.
- Con los porcentajes de agua y los porcentajes de cambio de volumen, se construye una gráfica en rayado natural, colocando en el eje de las ordenadas los porcentajes de cambio de volumen y en las abscisas los porcentajes de agua. Se traza una línea uniendo los puntos donde hay variación de volumen y otra que une los puntos donde la variación de volumen es casi nula; el valor de la humedad en por ciento que corresponda al cruce de estas dos líneas en el límite de contracción  $L_C$ .

#### Índices de consistencia.

Los índices de consistencia se deducen de los límites líquido, plástico y de contracción, en la forma siguiente:

a) Índice de plasticidad  $I_p$ , es la diferencia en por ciento, que hay entre el límite líquido  $L_L$  y el límite plástico  $L_P$ .

$$I_p = L_L - L_P$$



b) Índice de escurrimiento o fluidez ( $F_w$ ), se define como la pendiente de la curva de escurrimientos; numéricamente se obtiene de la diferencia de humedad en un ciclo completo, considerándola en su fracción racional.

Ejemplo: el ciclo completo es de 5 a 50 golpes, el valor de humedad expresada en fracción racional correspondiente a 5 golpes es igual a 0.834 y la correspondiente a 50 golpes es igual 0.629, la diferencia es  $F_w$ :

$$F = 0.834 - 0.629 = 0.205$$

c) Índice de tenacidad  $T_w$  se obtiene de dividir el índice de plasticidad  $I_p$  entre el índice de escurrimiento  $F_w$ , ambos expresados en fracción racional.

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

d) Consistencia relativa está dada por la fórmula:

$$Cr = \frac{L_L - \omega}{I_p}$$

Donde:

Cr=Consistencia relativa

$\omega$ = Humedad del material considerado

$L_L$ =Límite Líquido

$I_p$ = Índice de plasticidad.

e) Índice de contracción  $I_c$ , se obtiene de restar al límite plástico el límite de contracción.

$$I_c = L_p - L_c$$

f) Relación agua-plasticidad, B expresada en por ciento es:

$$B = \frac{\omega}{I_p} \cdot L_p \cdot 100$$



## VI DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD

En 1856, H. Darcy estableció la ley que rige el flujo agua a través de los suelos, expresándola como sigue:

$$Q = kiA$$

en donde

Q: gasto que pasa a través de la muestra,

k: coeficiente de permeabilidad,

$i$ : gradiente hidráulico,

A: área de la sección transversal de la muestra.

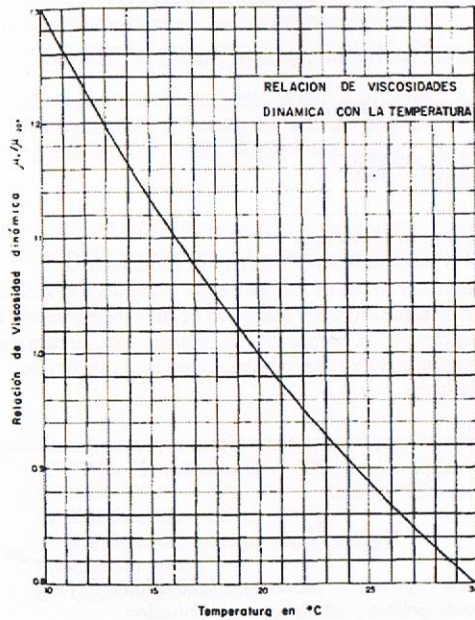
Esta expresión sólo es válida si el escurrimiento es laminar. El coeficiente de permeabilidad  $k$  depende del tamaño y forma de los granos que componen el suelo, de la relación de vacíos, del grado de saturación, del contenido de materia orgánica y de la temperatura y solubilidad de sus elementos. Siendo este coeficiente distinto para cada tipo de suelo, es necesario determinarlo experimentalmente, mediante pruebas de permeabilidad, en cada caso particular.

Con objeto de establecer una base comparativa es conveniente expresar el coeficiente de permeabilidad refiriéndolo a la temperatura de 20° C. Si se conoce el valor  $k$ , a cualquier temperatura  $T$ , su valor a 20°C, será:

$$K_{20} = \frac{\mu_t}{\mu_{20}} K_t$$

siendo  $\mu$  la viscosidad dinámica del agua. Los valores de  $\mu_r/\mu_{20}$  para diferentes temperaturas aparecen en forma de gráfica y tabulados a continuación.

VISCOSIDAD DEL AGUA Y RELACIONES $\mu_T/\mu_{20}$		
GRADOS	$\mu_t$	$\mu_T/\mu_{20}$
10.0	1.3077	1.301190
11.0	1.2713	1.264970
12.0	1.2363	1.230140
13.0	1.2028	1.196810
14.0	1.1709	1.165070
15.0	1.1404	1.134720
16.0	1.1111	1.105570
17.0	1.0828	1.077410
18.0	1.0559	1.050640
19.0	1.0299	1.024770
20.0	1.0050	1.000000
20.2	1.0000	0.995020
21.0	0.9810	0.976110
22.0	0.9579	0.953130
23.0	0.9358	0.931140
24.0	0.9142	0.909650
25.0	0.8937	0.889250
26.0	0.8737	0.869350
27.0	0.8545	0.850240
28.0	0.8360	0.831840
29.0	0.8180	0.813970
30.0	0.8007	0.796710



La permeabilidad de un suelo se puede determinar directamente en el terreno, mediante pruebas o bien, en el laboratorio, utilizando muestras representativas.

Las pruebas de laboratorio se ejecutan utilizando aparatos especiales llamados permeámetros que pueden ser de carga constante, de capilaridad horizontal, de carga variable y permeámetro consolidómetro.

Un cuadro que muestra las pruebas de permeabilidad que requiere cada tipo de suelo, publicado por A. Casagrande y R. E. Fadum, se muestra a continuación.



COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

K en cm/seg. (Escala logarítmica)

	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>
PROPIEDADES DE DRENAJE	BUENO						MALO		PRÁCTICAMENTE IMPERMEABLE		
APLICACIÓN EN PRUEBAS DE TIERRA Y DÍQUIS	Secciones permeables de presas y diques						Secciones impermeables de presas y diques				
TIPOS DE SUELOS	Grava Limpia		Arenas Limpias Arenas limpias y mezclas de gravas.		Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos. Mezclas de arena, limo y arcilla morana <sup>®</sup> glacial, depósitos estratificados de arcilla, etc.			Suelos impermeables arcillosos homogéneos bajo la zona de intemperización.			
DETERMINACIÓN DIRECTA DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	Prueba directa del suelo en su estado natural (Prueba de bombas) Segura si se hace correctamente. Se requiere bastante experiencia.						Permeámetro de carga constante. Se requiere poca experiencia.				
DETERMINACIÓN INDIRECTA DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE SEGURO No se requiere mucha experiencia.			PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE INSEGURO Se requiere mucha experiencia.			APROXIMADAMENTE SEGURO Se requiere bastante experiencia.				
	Cálculo por medio de la distribución del tamaño del grano (Fórmula de Hazen) Aplicable solamente en arenas y gravas limpias y sin cohesión.						PRUEBA DE CAPILARIDAD HORIZONTAL. Se requiere poca experiencia. Útil para pruebas rápidas en el campo.			Cálculo por medio de pruebas de consolidación. Se requiere equipo de lab. Costoso y bastante exp.	
	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>
	K en m/año (Escala logarítmica)										

C = 31.5

b) Pruebas con permeámetro de carga constante.

Este permeámetro se utiliza para suelos relativamente permeables, tales como gravas, arenas y mezclas de arena y grava. Los Coeficientes de permeabilidad para esta clase de suelos varían de 10 a 10 cm/seg.

El procedimiento consiste en someter la muestra del suelo a un escurrimiento de agua bajo una carga constante. Es necesario conocer el área de la sección transversal de la muestra, su longitud, la carga a que está sometida y la temperatura del agua.

Equipo

- Permeámetro de lucita: Diámetro interior, 10 cm. 20 cm. para arenas; 20 cm. de diámetro interior, 1 m. de long.
- para gravas o mezclas de grava y arena.
- Dispositivo de abastecimiento.
- Termómetro.
- Cronómetro.
- Pisón metálico de 4 cm. de diámetro y 300 g. de peso.
- Malla Núm. 100 (0.149 mm.).
- Balanza de 2 kg. de capacidad y 0.1 g. de sensibilidad.

Procedimiento

1.- Se mide el diámetro promedio del permeámetro y se determina su área transversal.

2.-Se coloca la malla en el extremo inferior del permeámetro y se pesa este conjunto, que se considera como la tara, registrando su valor en el renglón respectivo, así como el número del permeámetro.

3.- El material seco se coloca en capas, apisonándolas con un número variable de golpes, a fin de que la muestra quede uniformemente compactada en todo su espesor. Por medio de ensayos preliminares de compactación, se tratará de hallar el espesor de las capas, así como la intensidad y el número de golpes requeridos para que el espécimen tenga la misma relación de vacíos que se obtiene en su correspondiente prueba de densidad relativa.

4.-Se pesa el permeámetro con la muestra compactada; este peso menos el de la tara representa el peso de la muestra seca, que se anota en el renglón respectivo, así como la longitud total de la muestra (L).

5.-Se satura la probeta por capilaridad, sumergiéndola lentamente en un recipiente con agua destilada y procurando que el nivel de la línea de saturación quede arriba del nivel del agua del recipiente, con objeto de que la saturación se efectúe exclusivamente por capilaridad y la expulsión del aire de la muestra sea más efectiva.

Al terminar de saturar la muestra, se permite que el agua del recipiente quede arriba del nivel superior de la muestra e inmediatamente se coloca el permeámetro en posición de prueba, agregándole agua hasta derramar, conectándola con el sistema de abastecimiento y dando un gradiente menor que 4, para evitar canalización y boiling.

El gradiente  $i$  en permeabilidad está dado por el cociente de la carga de agua  $h$  entre la longitud de la muestra  $L$ .

6.- Se deja escurrir el agua por espacio de 15 minutos a fin de establecer el régimen; y una vez logrado esto, se procede a hacer las mediciones.

7.- Una vez establecido el régimen, se cierra la llave superior llenando de agua la bureta por la vena más larga, y se abre la llave inferior, hasta llegar a una marca conocida; ciérrase la llave, y conéctese a la atmósfera la vena más larga.

8.-Simultáneamente ábrase la llave inferior y póngase en marcha el cronómetro; al pasar el nivel del agua de la bureta por otra marca conocida, se para el cronómetro.

El tiempo transcurrido en segundos se anota, la temperatura y el volumen obtenidos por la diferencia de las lecturas de la bureta, se anotan de igual forma.

Se repite el proceso anteriormente descrito hasta encontrar una concordancia satisfactoria en los resultados, variando la carga de agua.

9.- Para calcular el coeficiente de permeabilidad, se aplica la fórmula:

$$K = \frac{VL}{Aht}$$



siendo  $V$  el volumen de agua medido,  $L$  la longitud de la muestra,  $A$  el área de la sección transversal del espécimen,  $h$  la carga bajo la cual se produce la filtración y  $t$  el tiempo en que se efectuó la prueba, expresado en segundos.

Se reduce el valor del coeficiente de permeabilidad a la temperatura de 20°C, mediante la expresión:

$$k_{20^\circ} = k_T \frac{\mu_T}{\mu_{20}}$$

La relación de vacíos  $e$  de la muestra se calcula con la fórmula:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_t S_s - W_s}{W_s}$$

siendo  $V_v$ , volumen de vacíos,  $V_s$  volumen de sólidos,  $V_t$  volumen total,  $S$  densidad de sólidos,  $W_s$  peso de los sólidos.

Cuando el material es grava o mezcla de grava y arena, el procedimiento y el cálculo son exactamente iguales a los explicados, con la diferencia que se usa un permeámetro de dimensiones mayores, apropiado al tamaño de la grava.

Para simplificar los cálculos, utilícese el nomograma de permeabilidad para el método de carga constante.

c) Prueba de permeabilidad por capilaridad horizontal.

Debido a las fuerzas capilares, el agua que penetra en suelo seco avanza con cierta velocidad, en función de la cual se puede determinar indirectamente la permeabilidad del suelo.

Esta prueba es adecuada especialmente para ensayar con rapidez un gran número de muestras en el campo. Se usa cuando los materiales tienen una permeabilidad comprendida entre 10 y 10- cm/seg.

#### Equipo

- Permeámetro de lucita de 5 cm. de diámetro y 20 cm. de largo, con una malla fija en uno de sus extremos.
- Tubo de hule o sarán de 2 m. de largo y 6.3 mm. (1/4") de diámetro.
- Tres mallas metálicas del Núm. 100 (0.149 mm.), recortadas en forma de disco de unos 5 cm. de diámetro.
- Tapón de hule perforado con un tubo de vidrio.
- Arena gruesa y limpia de Ottawa, u otra equivalente.
- Cronómetro.
- Termómetro.
- Frasco o depósito de abastecimiento con agua.
- Balanza para pesar el permeámetro y la muestra.
- Pisón para compactar el material.
- Dos escalas graduadas en centímetros y milímetros, que se adhieren al permeámetro.

Procedimiento

- 1.-Se mide el diámetro promedio del permeámetro y se determina su área, anotando éstos, así como el número del permeámetro en el registro.
- 2.-En la balanza de torsión, se pesa el permeámetro con una malla colocada en uno de sus extremos, y se hace la anotación correspondiente en el registro.
- 3.-El material seco se coloca en capas de 1 cm. de espesor, apisonando cada capa con un número variable de golpes, a fin de que el espécimen quede uniformemente compactado en todo su espesor y tenga la relación de vacíos prescrita.
- 4.-Se pesa el permeámetro con la muestra compactada; la diferencia con el peso del permeámetro vacío es el peso de la muestra seca.
- 5.-Se aplica, sobre la cara exterior del permeámetro, una de las escalas, de manera que el cero coincida con la base inferior del espécimen.
- 6.-Sobre la muestra compactada, se coloca un disco de malla Núm. 100 (0.149 mm.) y a continuación una capa de arena de Ottawa, de un espesor tal que permita el ajuste del tapón de hule en el permeámetro; entre la arena y el tapón, se interpone otra malla Núm. 100 (0.149 mm.).

Estas operaciones deben ser ejecutadas con todo cuidado para evitar alteración en la muestra.

Con objeto de eliminar escapes de agua entre el tapón y el permeámetro, se sella la junta con cera derretida.

- 7.- Se conecta el permeámetro con el depósito de abastecimiento de agua y, a fin de desalojar la mayor cantidad de aire, tanto del tubo de sarán como del permeámetro, se pone éste en posición vertical con la entrada del agua por la parte inferior.
  - 8.-Se hace que el agua vaya penetrando muy lentamente hasta que la arena de Ottawa se sature y, al llegar a la muestra, se coloca el permeámetro en posición horizontal, procurando que la carga de agua  $h_0$  sea pequeña (en el ejemplo 5.4 cm.), en ese momento se empieza a contar el tiempo con un cronómetro.
- Durante la prueba, se rueda lentamente el permeámetro en un sentido y en otro, con el objeto de que el frente mojado avance en lo posible uniformemente dentro del espécimen.
- 9.-El avance del agua se mide a partir del extremo de entrada del agua a la muestra (cero de las escalas). Todos los tiempos se cuentan desde que el agua entra en ella. Las lecturas tiempo  $t$  - distancia  $x$ , se hacen cada vez que el agua avanza un centímetro, se deben de anotar.

El avance del agua en la muestra se efectúa debido a dos cargas: la carga de capilaridad  $H_c$  que actúa en el frente de avance del agua y la carga de presión  $h_0$  provocada por la



diferencia de elevación entre el nivel del agua en el depósito de abastecimiento y el eje de simetría de la probeta.

10.- Es necesario, durante la ejecución de la prueba, variar la carga de presión; para esto se inicia el ensayo con el depósito de abastecimiento a una altura tal que la diferencia entre los niveles del agua en el depósito y en el centro de la muestra sea de 5 a 15 cm. Una vez que el agua ha avanzado hasta mitad de la longitud de la muestra, se aumenta la carga presión, subiendo el depósito de abastecimiento hasta una altura tal que el desnivel del agua sobre el centro de la muestra sea más o menos de 1 m. para suelos arenosos; y aproximadamente de 2 m., para suelos limosos.

La temperatura del agua del depósito de abastecimiento, se debe de anotar.

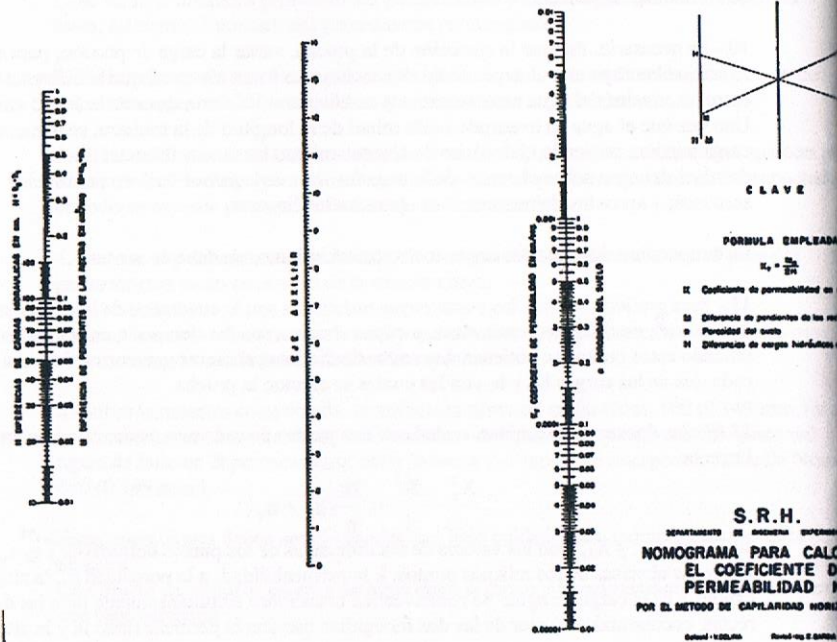
11.- Para graficar, se fijan los puntos cuyas ordenadas son los cuadrados de los avances del agua  $x^2$ , medidos en centímetros, y cuyas abscisas son los tiempos  $t$ , en segundos; uniendo estos puntos se obtienen dos rectas de distinta pendiente que corresponden a cada una de las cargas  $h_0$  y  $h_0$  con las cuales se efectuó la prueba.

12.-En las dos rectas obtenidas, se definen dos puntos de cada una, teniendo en cuenta la fórmula:

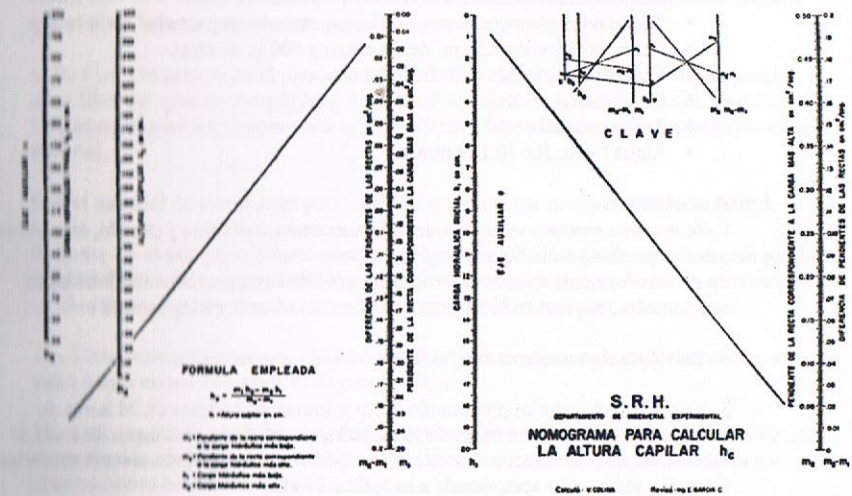
$$\frac{X_2^2}{t_2} - \frac{X_1^2}{t_1} = \frac{2k}{n}(h_c + h_0)$$

en la que  $X_2^2$  y  $X_1^2$  son los valores de las ordenadas de los puntos definitivos y  $t_2$ ,  $t_1$ , los de las abscisas de los mismos puntos,  $k$  la permeabilidad,  $n$  la porosidad  $h_c$ , la altura capilar y  $h_0$  la carga de agua. Se resuelven las ecuaciones simultáneamente para las dos rectas, encontrando el valor de las dos incógnitas que son la permeabilidad  $k$  y la altura capilar  $h_c$ .

El cálculo del coeficiente de permeabilidad puede facilitarse con el empleo del nomograma de permeabilidad por capilaridad horizontal que aparece a continuación



Y para calcular la altura capilar se utiliza el siguiente nomograma:



d) Pruebas con permeámetro de carga variable.

Esta prueba se utiliza para determinar el coeficiente de permeabilidad de suelos relativamente impermeables, tales como mezclas de arena, limo y arcilla; limos con arcillas o arcillas simplemente.

El coeficiente de permeabilidad de estos suelos varía de  $10^{-4}$  a  $10^{-9}$  cm/s.

El aparato usado es un permeámetro como el de carga constante, al cual se le agrega una tapa superior provista de dos tubos, uno de sarán, por donde se alimenta el agua y el otro de vidrio, que funciona como piezómetro con el cual se miden las cargas y los volúmenes de agua que se filtran a través de las muestras.

Es indispensable que la temperatura del agua permanezca lo más uniforme posible entre una lectura y otra; esto se logra introduciendo los permeámetros en un recipiente con agua.

El agua que sirve para hacer la determinación en el laboratorio debe ser desaireada.

Equipo

- \* Permeámetro de lucita o de latón: Diámetro interior, 5cm; longitud, 10 cm.

- Tapa de lucita o de latón con piezómetro calibrado.
- Dispositivo de compactación.
- Tapón de madera para apoyo de la muestra al compactarla.
- Pisón metálico de 2.5 cm. de diámetro y 500 g. de peso.
- Guía de lámina galvanizada de 20 cm.
- Cronómetro.
- Termómetro.
- Malla Núm. 100 (0.149 mm.).

*Procedimiento*

1.-Se toma un permeámetro previamente numerado, calibrado y pesado, anotando estos datos respectivos en la hoja de registro.

En el caso frecuente de medición de permeabilidad en materiales artificialmente compactados, se prepara la muestra en la forma indicada en los pasos 2 a 4:

2.- Se sujeta el permeámetro en el dispositivo de compactación.

3.-Se prepara el material procurando darle la humedad óptima con 24 horas de anticipación guardándolo en un frasco tapado, se compacta en 3 capas de 1 cm de espesor dándole el número necesario de golpes en cada capa para obtener una relación de vacíos uniforme y aproximada a la óptima Proctor.

Para determinar el número de golpes por cada capa se puede emplear la siguiente fórmula de la energía de compactación.

$$E = \frac{W_0 H_0 N}{V_0}$$

donde:

E, energía de compactación; en kg.-cm./cm<sup>3</sup>.

W<sub>0</sub>, peso del martillo, en kg.

H<sub>0</sub>, altura de caída, en cm.

N, número total de golpes.

V<sub>c</sub>, volumen total de la probeta compactada, en cm<sup>3</sup>.

4.-Con el mismo pisón se nivela la superficie de la muestra, procurando que el espesor sea lo más uniforme posible, limpiándola perfectamente.

5.-Se mide la longitud inicial L<sub>1</sub> y se anota en el registro respectivo, se pesa el permeámetro con la muestra húmeda, anotando su valor como peso muestra húmeda + tara.

6.-Se coloca el permeámetro en el recipiente donde se va a hacer la prueba, poniéndole la tapa con su piezómetro calibrado. Se procede a llenarlo con agua desaireada del sistema procurando sacar todas las burbujas de aire, por el tornillo de escape. Es conveniente tener un volumen grande de agua en el recipiente para que las variaciones de temperatura en el permeámetro sean pequeñas y no afecten a las lecturas.



7.-Se carga el piezómetro y se hace fluir el agua a lo largo del tubo 2 o 3 veces, durante varios días para saturar el material y establecer el régimen teniendo cuidado de no dejar que el nivel baje tanto que pueda permitir la entrada de aire.

8.-Se fijan tres marcas en el piezómetro y se miden cuidadosamente sus distancias al nivel libre del agua en el recipiente. Este nivel se mantiene constante con un vertedor. La distancia entre las marcas varía de 10 a 40 cm., dependiendo de la permeabilidad del material.

Con el material no usado en el permeámetro se determina su contenido de humedad.

9.-Se espera el tiempo necesario para que el agua del piezómetro descienda y pase por la siguiente marca se toma nuevamente la hora t<sub>2</sub>, la temperatura T<sub>2</sub> y la fecha, anotándolas en el mismo renglón y en sus columnas respectivas de cada muestra.

10.- Estas determinaciones se repiten tantas veces como sea necesario para obtener un valor más o menos constante de la permeabilidad.

11.- Una vez terminada la prueba, se desconecta el permeámetro del sistema, se mide la altura final L<sub>r</sub> de la pastilla, se dibuja en el croquis su esquema y se anotan todas las observaciones hechas durante la prueba.

12.-Se saca el material del permeámetro, se coloca en una cápsula tarada y numerada, se pesa y se anota como peso muestra húmeda + tara, y se introduce al horno para su secado.

## VII CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

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

Cuando un suelo saturado se somete a un incremento de carga, la acción de ésta se transmite, en un principio, al agua que llena los poros del material por ser el líquido incompresible comparado con la estructura que forman las partículas sólidas del suelo.

Debido a la presión que de este modo se induce en el agua, ésta fluye hacia las fronteras en las cuales dicha presión se disipa, produciéndose variaciones en el volumen del material y la transferencia de la carga a la estructura sólida. La velocidad con que se produce este fenómeno, conocido en Mecánica de Suelos con el nombre de consolidación, depende de la permeabilidad del suelo, al igual que de otras condiciones geométricas y de frontera (drenes).

En las arcillas francas, que representan un caso límite, el proceso es muy lento; mientras que en una capa de arena limpia, que resulta ser el límite opuesto, el retardo hidrodinámico con que se transfieren los esfuerzos aplicados a la estructura sólida, es muy pequeño. Tratándose de grandes masas de arena y de cargas aplicadas rápidamente, el fenómeno debe tomarse en consideración; es el caso de una presa construida con arena, saturada por filtración y sujeta a los efectos de un sismo.

La prueba de consolidación estándar consiste en comprimir verticalmente un espécimen del material que se estudia, confinado en un anillo rígido, siguiendo una secuencia de cargas establecida de antemano. En todos los casos y para cada incremento de carga, el espécimen sufre una primera deformación correspondiente al retraso hidrodinámico que se llama consolidación primaria, y también sufre una deformación adicional, debida a un fenómeno secundario, que en las arcillas se llama retraso plástico y en las arenas retraso friccional.

En general el suelo se deformará siempre una cantidad mayor que la correspondiente al retraso hidrodinámico exclusivamente. Sin embargo, el retraso hidrodinámico es el único que toma en cuenta la teoría de la consolidación. Según la teoría, sólo es posible un fenómeno de consolidación cuando existe escape de agua hacia el exterior de la masa de suelo. En la práctica se admite que también se genera un proceso similar en masas de suelo que no están 100% saturadas. En estos casos se aplica también la teoría de la consolidación, teniendo presente que se trata sólo de una interpretación aproximada.

Simultáneamente con el proceso de consolidación se puede efectuar o no, según se juzgue conveniente, una prueba de permeabilidad de carga variable; o bien, reproducir una condición hidrodinámica adicional, como la que originaría una presión artesiana.

De la prueba de consolidación se obtienen los coeficientes que se indican:



1.- El coeficiente de compresibilidad  $a_v$  que representa la relación deformación-esfuerzo del suelo, sin tomar en cuenta el tiempo, y que geoméricamente, es igual a la pendiente de la curva relaciones de vacíos-presiones. La expresión matemática es:

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} = \frac{e_2}{p_2} - \frac{e_1}{p_1} \quad \text{cm}^2 / \text{kg}$$

donde:  $e_1$  y  $P_1$ , son la relación de vacíos y la presión en una etapa (1) y  $e_2$ ,  $P_2$ , en una etapa (2).

2.- El coeficiente de consolidación  $C_v$  que es una relación teórica establecida para simplificar la ecuación diferencial del proceso de consolidación y cuya expresión simplificada es:

$$C_v = \frac{0.197H^2m}{t_{50}} \quad \text{cm}^2 / \text{s}$$

en donde:  $Hm$ : longitud de la trayectoria de dren más corta en cm.

$t_{50}$ : tiempo en segundos, correspondiente al 50% de consolidación primaria para el incremento de carga considerado.

3.- El coeficiente calculado de permeabilidad  $k_m$  que es igual a:

$$k_m = \frac{a_v C_v \gamma_w}{(1 + e_m)1000} \quad \text{cm/s.}$$

En donde:

$a_v$  y  $C_v$  ya se definieron.

$\gamma_w$ : peso volumétrico del agua en g/cm<sup>3</sup>.

$e_m$ : relación media de vacíos.

4.- Finalmente, la relación de consolidación primaria  $r$  que expresa la relación entre la deformación debida a la consolidación primaria y la deformación total que sufrió el espécimen en cada incremento de carga. Por tanto,

$$r = \frac{d_s}{d_0} - \frac{d_{100}}{d_f}$$

En donde:

$d_i$ : deformación en el 0% de consolidación primaria.

$d_{100}$ : deformación en el 100% de consolidación primaria.

$d_0$ : deformación inicial del espécimen. (Tomada como la lectura inicial del micrómetro.)

$d_f$ : deformación final del espécimen. (Tomada como la deformación a las 24 horas de iniciada la prueba.)

Equipo

- ♦ Consolidómetro compuesto de: anillo, base con piedra porosa, piezómetro calibrado, placa con puente para apoyar micrómetro, balín, piedra porosa y micrómetro con soporte.
- ♦ Banco de consolidación.

*Procedimiento*

Preparación de la muestra. La preparación de la muestra difiere según sea ésta inalterada o remoldeada.

**A) Muestra inalterada.** En este tipo de muestras es necesario tener en cuenta la dirección en que se efectúa el flujo en el terreno. Se toma un trozo de material aproximadamente de 9 X 9 X 9 cm.

**Método del torno.** Este método requiere una plataforma giratoria sobre la cual descansa la muestra, una cuchilla especial y una espátula.

1.-Sobre el dispositivo se coloca el trozo de material; con el anillo presentado en la forma que se indica, se va labrando el espécimen con ayuda de la cuchilla, girando al mismo tiempo la base y forzando ligeramente el anillo para que penetre en la muestra.

2.- Cuando se ha logrado que el material llene completamente el anillo, se corta la parte inferior de la muestra, utilizando una espátula de cuchilla o el cortador de alambre.

3.-Se enrasan las caras de la probeta cortando el material sobrante con el alambre acerado montado en un arco.

4.-Si con a operación anterior, las caras del espécimen han quedado desniveladas o con pequeñas oquedades debidas a desprendimientos durante el corte se terminan las caras, agregando material con la espátula y sin comprimir excesivamente para no alterar la relación de vacíos.

**Método del cortador circular.** Se emplea cuando la dureza del material no permite utilizar el procedimiento anterior. El aparato consta de una plataforma que tiene un soporte, en el cual se fija una guía y una tuerca donde un vástago con un tramo roscado y maneral, sirve para hacer subir o bajar un cilindro hueco provisto de una cuchilla circular en el extremo opuesto a su unión con el vástago. En el interior del dispositivo, entre la cuchilla y el cilindro, se coloca el anillo que dará forma a la probeta. La cuchilla se va hincando sobre la muestra, previamente desbastada en forma tronco cónica, hasta obtener una pastilla de dimensiones poco mayores que el anillo. Se repite del 2-4.

5.-Para evitar pérdidas de humedad mientras se pesa la muestra y se anotan los datos en el registro, se protegen sus dos caras con vidrios, previamente numerados y tarados, se pesa 1 conjunto en una balanza de 0.1 g. de aproximación, y se anotan los datos en el registro respectivo.

B) Muestras remoldeadas.



Se compactan en 3 capas, utilizando una prensa o pisón y guía (equipo de compactación, carga variable) tratando de obtener con cualquiera de los dos métodos una compactación previamente escogida, generalmente la d la prueba Proctor. Se repiten los pasos 3, 4 y 5.

6.-Se toma una muestra del mismo material, para determinar su contenido de agua, anotando los datos en "contenido de agua testigo" del registro.

7.-Se determina el coeficiente de permeabilidad de la piedra porosa de la base antes y después de la prueba, utilizando el método de carga variable y registrando sus datos como permeabilidad piedra porosa.

8.- Se llenan los drenes de la base y se saturan las piedras porosas del consolidómetro, se retiran los vidrios del anillo con la muestra y se coloca éste en la base, sujetándolo firmemente con unas secciones adecuadas.

Para evitar que la piedra porosa se tape, hay que pasarle aire a presión.

9.- Se coloca la piedra porosa superior, previamente saturada, sobre la pastilla, procurando centrarla bien, es decir, que no haga contacto con el anillo de bronce.

10.-Se instala el conjunto sobre uno de los recipientes del banco de consolidación, siendo necesario que el marco esté elevado con unos separadores (taquetes de madera), que permitan la maniobra. El consolidómetro debe quedar bien centrado en dicho recipiente.

11.-Se pone la placa con el puente para apoyar el micrómetro; se coloca un balín en una concavidad hecha para tal objeto tanto en la placa como en el marco. El conjunto debe estar bien centrado para que coincida con el taladro del marco.

12.-Se coloca el soporte con el micrómetro, el cual debe hacer contacto con el puente, procurando que el micrómetro quede vertical.

13.-Se instala el piezómetro, previamente calibrado.

14.- Saturación. La muestra puede saturarse estando completamente exenta de carga o bien con una carga prefijada según el problema que se tenga, siguiéndose en ambos casos el mismo procedimiento: Se cubre con agua destilada hasta la altura de la piedra porosa superior, procurando no mezclarle más aire del que ordinariamente pueda tener. Después de 10 segundos de estar la muestra en contacto con el agua, si la manecilla del micrómetro no se ha movido, se echará a andar el cronómetro. Si la manecilla ya se había empezado a mover antes, se contará el tiempo a partir de cuando se inició el movimiento.

15.- Se tomará una serie de lecturas de tiempo y micrómetro, las suficientes para definir completamente la curva de tiempo-deformación. Se dará por terminada esta etapa y se pasará a la siguiente cuando a criterio del operador se considere saturada la muestra. Si el hinchamiento, en caso de que lo haya, excede a 50 micras, se enrasará nuevamente el



anillo esto si la carga durante la saturación es nula, antes de aplicar cualquier carga. Los datos se anotan en un registro.

#### 16.- Carga.

La aplicación de las cargas en el dispositivo de consolidación se efectúa de acuerdo con el problema que debe resolverse. Dichas cargas se transforman en presión (P) sobre la pastilla.

El método de aplicación de carga es el siguiente:

Se anotan la lectura inicial del micrómetro, la temperatura del agua contenida en el recipiente del banco de consolidación, la fecha y hora de principio de la prueba. La prueba ha principiado cuando uno de los operadores, habiendo retirado los taquetes de madera, pone cuidadosamente en contacto el marco con el balín.

En el mismo instante otro operador pone en marcha el cronómetro y toma lecturas simultáneas en el micrómetro y en el cronómetro, de acuerdo con los tiempos transcurridos anotados en el registro de carga.

17.- Este primer paso ha concluido cuando, con los puntos obtenidos durante el mismo, es posible definir la curva Deformación-Tiempo.

18.- Se aplica el siguiente incremento de carga, que, sumado al precedente, origina nueva presión sobre la pastilla.

19.- Se repite el paso 18, incrementando la presión sobre la pastilla, hasta llegar a obtener una presión sobre la muestra similar a la del problema por resolver.

#### 20.- Descarga.

El proceso de la descarga se efectúa, generalmente, en forma inversa al de la carga, o sea que la carga máxima aplicada se reduce a la mitad y así sucesivamente hasta obtener una presión nula sobre la pastilla. En ocasiones y de acuerdo con el problema que se estudia, la descarga se puede llevar a cabo en otra forma. Se anota en el registro de descarga, la presión, fecha, hora y lectura inicial del micrómetro. Al tiempo que un operador quita la carga del dispositivo, otro pone en marcha el cronómetro y principia a tomar lecturas simultáneas para tiempo y recuperación hasta definir la curva. Cuando se ha descargado totalmente, se deja que la pastilla se recupere hasta observar que la diferencia de lecturas del micrómetro sea pequeña.

21.- Si se juzga conveniente, puede determinarse la permeabilidad de la muestra con diferentes relaciones de vacíos. Daremos un ejemplo, utilizando el método de carga variable.

Para obtener en la última descarga, una presión nula sobre la pastilla, no debe existir contacto entre el marco y el balín lo cual se logra levantando el marco por medio de los separadores de madera.

Se determina la permeabilidad con la relación de vacíos inicial (antes de aplicar carga), y después, al finalizar completamente la consolidación para cada presión, o bien al terminar la recuperación en cada descarga. Para ello, se inyecta agua destilada y



destilada, por la llave libre, hasta subir el nivel piezométrico; desconectando el abastecimiento de agua, se dejará que del piezómetro baje y salga el agua por la llave libre, arrastrando a su paso el poco aire que ésta pudiera tener.

22.- Seguros de que no existen burbujas de aire que alteran los resultados, se hará subir el nivel piezométrico a una altura de 10 a 40 cm., de acuerdo con el tipo de material de que se trate, para que no cause arrastre o canalizaciones en la pastilla.

23.- Establecida y marcada sobre el tubo la carga piezométrica adecuada, se seguirá el mismo procedimiento utilizado en una prueba de permeabilidad con carga variable.

24.- Con los datos de permeabilidad obtenidos en las distintas etapas de consolidación, se construye una gráfica de relación de vacíos-permeabilidad.

25.- Una vez hechas todas las determinaciones, se procede a desmontar la pastilla, quitando el piezómetro, el micrómetro, la placa con puente y balín, y finalmente se saca del banco de consolidación el anillo con la pastilla.

26.- Se desarma el consolidómetro para sacar el anillo con la muestra consolidada; en caso de estar húmedo el anillo de bronce se seca y se pesa juntamente con la muestra húmeda, anotando el valor en Datos Generales como peso probeta + anillo después de consolidada.

27.- Se pasa la probeta del anillo a una cápsula numerada y tarada, procurando no perder material y se introduce en el horno a 110° C durante 18 horas mínimo, para su secado. Finalmente se saca del horno, colocándola dentro de un desecador para que se enfíe y se vuelve a pesar, anotando este valor como peso probeta seca ± cápsula.

#### b) Calibración del banco de consolidación.

El aparato de consolidación debe calibrarse por los conceptos (A) y (B)

A.- Se determina la relación de brazos para poder calcular el peso que se requiere en el dispositivo de carga para obtener una carga determinada sobre el marco del consolidómetro, para lo cual:

1.- Se coloca un dinamómetro calibrado, provisto de micrómetro, entre el banco y el marco

2.- Se hace la lectura inicial del micrómetro; se aplica un peso sobre el dispositivo, y se lee nuevamente el micrómetro.

3.- La diferencia de lecturas da la deformación del dinamómetro; con este valor, se encuentra, por medio de la gráfica de calibración, del dinamómetro, la fuerza que se está aplicando en el marco.

4.- Se divide la fuerza aplicada en el marco, entre el peso colocado en el dispositivo de carga. Este cociente es la relación de brazos del aparato.

5.-Conociendo el área de cada anillo de consolidación, se multiplica ésta por cada uno de los incrementos de presión que se deseen aplicar, y cada producto se divide entre la relación de los brazos, obteniendo de esta manera el peso que debe aplicarse en el dispositivo para obtener cada uno de los incrementos aludidos.

B. Deben conocerse las deformaciones con respecto al tiempo que sufre el banco durante cada etapa de carga o descarga, por tanto:

1.- En el banco se coloca el consolidómetro, con sus piedras porosas, su placa con puente y balín, sujetando el micrómetro, que debe quedar vertical.

2.-Un operador aplica una carga al dispositivo y simultáneamente otro pone en marcha el cronómetro, siguiendo un proceso de lecturas micrómetro-cronómetro, similar al de consolidación.

3.-Esta calibración debe abarcar todos los incrementos de carga que se utilicen en consolidación, así como todas las etapas de descarga.

4.-Con los datos obtenidos en cada determinación, se formulan tablas tiempo-deformación para cada etapa.

c) Cálculo.

1.-En el registro de datos generales del ensayo, se calcula la humedad  $\omega$ , la relación de vacíos  $e$  y el grado de saturación  $G$ , antes y después de la consolidación, de la siguiente manera:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

donde  $W_w$ , peso del agua, y  $W_s$ , peso de los sólidos.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

donde  $V_v$ , volumen de vacíos, y  $V_s$ , volumen de sólidos. Por otra parte,

$$V_s = \frac{W_s}{S_s} \quad \text{y} \quad V_v = V_t - V_s$$

en donde  $S_s$  es la densidad de los sólidos,  $V_t$ , el volumen total de la muestra.

2.- La deformación, se calcula restando de la lectura inicial del micrómetro, las subsecuentes lecturas y a cada diferencia se le resta la deformación del aparato.



3.- La recuperación, se calcula haciendo la diferencia entre las lecturas del micrómetro en cada tiempo, y la lectura inicial y a este resultado se le resta su correspondiente corrección de aparato.

4.- A cada etapa de carga le corresponde una serie de valores tiempo-deformación que permiten construir una curva sobre rayado semilogarítmico cuyas abscisas (escala logarítmica) representan el tiempo en minutos y cuyas ordenadas (escala aritmética), representan la deformación en milímetros.

En ocasiones no es posible, mediante esta curva, definir las características del suelo en estudio y entonces se recurre con los mismos datos de la anterior al trazo de una curva

(tiempo  $\Delta$ deformación), en rayado aritmético.

5.- Si la curva elegida es la dibujada en rayado semilogarítmico, en ella puede obtenerse el 0% teórico de consolidación como se explica en seguida: se escoge un punto de la curva, próximo al eje de las deformaciones, se observa el tiempo que, como abscisa, le corresponde y se busca sobre la curva el punto cuya abscisa sea cuatro veces la del punto originalmente elegido. La diferencia de ordenadas entre ambos puntos se duplica y este valor se lleva a partir del segundo punto mencionado, sobre una paralela al eje de las ordenadas, obteniéndose de este modo un tercer punto por el cual se hará pasar una paralela al eje de los tiempos que es la que define el 0% teórico de consolidación.

El 100% teórico de consolidación queda definido por la intersección de la tangente al tramo central de la curva con la asíntota del tramo final de la misma. Definidos el 0% y el 100% teóricos de consolidación, al punto medio del segmento entre ambos corresponderá el 50% teórico de consolidación. El tiempo correspondiente a este porcentaje de consolidación  $t_{50}$  queda determinado por la abscisa del punto de intersección entre la curva y la paralela al eje de los tiempos, trazada por el punto medio del segmento aludido.

6.-Si la gráfica empleada es de rayado aritmético, se definirá el tiempo que corresponda al 90% de consolidación  $t_{90}$ , siguiendo los pasos que indica el libro de Taylor, párrafo 10-13, método (a), de la página 238.

De la curva ( $\sqrt{t}$   $\Delta$ deformación), se obtiene el  $t_{90}$  mediante el método que sigue;

Se traza una línea que comprenda a la sección recta de la curva en cuestión. Tomando dos o más puntos de dicha línea recta, se multiplican sus abscisas correspondientes por la constante 1.15. Estos productos nos dan las abscisas de otros tantos puntos con los cuales trazaremos una segunda recta.

La intersección de ésta con la curva de nuestro trazo ( $\sqrt{t}$   $\Delta$ deformación), nos define con su abscisa el tiempo que corresponde al 90% de consolidación  $t_{90}$ .

7.-En el resumen general del cálculo de una prueba de consolidación, se reúnen todos los datos de carga y descarga obtenidos durante el proceso.

8.-En la columna "Presión", se registran todos los incrementos de presión, a partir de cero y todos los decrementos de la descarga, hasta llegar nuevamente a cero.

9.-La columna "Relación de consolidación primaria  $r$ " se calcula, para cada etapa de carga, con la fórmula dada ya en generalidades.

10.-La columna "Deformación lineal  $\delta$ , en mm.", se forma de la siguiente manera: a una presión nula le corresponde una deformación cero; al primer incremento de presión le corresponde una deformación dada, al segundo incremento de carga le corresponde otra deformación, que sumada a la deformación del primer incremento de presión nos da la deformación acumulativa correspondiente a este segundo incremento de presión. A este valor se le sumará la deformación correspondiente al siguiente incremento de presión y así sucesivamente, en la inteligencia de que al llegar a la etapa de descarga, dicha deformación en lugar de sumarse deberá restarse en cada caso por ser de signo contrario a la deformación obtenida en la etapa de carga.

11.-La deformación unitaria ( $\epsilon$ ) en %, se calcula dividiendo la deformación lineal ( $\delta$ ) de cada renglón entre el espesor inicial ( $2H_1$ ) y multiplicando por cien.

12.-El espesor comprimido ( $2H$ ) en mm, es para cada renglón, igual al espesor inicial  $2H_1$  menos la deformación lineal correspondiente.

13.-Para calcular la columna ( $2H-2H_0$ ) en mm., previamente se obtiene el valor del espesor de los sólidos ( $2H_0$ ), que será constante si no hay pérdida de material durante el proceso:

$$2H_0 = \frac{W_s * 10}{\gamma_w S_s A_c}$$

donde  $W_s$  es el peso de los sólidos en g,  $\gamma_w$  peso volumétrico del agua a la temperatura de prueba en  $g/cm^3$ ,  $S_s$  densidad de los sólidos y  $A_c$  área de la pastilla en  $cm^2$ .

14.-La relación de vacíos  $e$ , se calcula con la fórmula correspondiente.

15.- La columna  $H_m$ , en cm, se calcula teniendo en cuenta las condiciones de drenes que se hayan utilizado. En este caso se utilizaron dos drenes y la forma de calcularla es sumar los espesores comprimidos en cada dos incrementos y dividir entre cuatro. Estos valores sólo se calculan para la etapa de carga.

16.-Se elevan al cuadrado los valores de  $H_m$  y se obtiene  $H_m^2$  en  $cm^2$ .

17.- En la siguiente columna se anotan los valores de  $t_{50}$  en s, obtenidos de las gráficas tiempo-deformación y haciendo la conversión a segundos.

18.- El coeficiente de compresibilidad  $a_v$ , en  $cm^2/kg$ ., se calcula con la fórmula ya establecida:



$$a_v = \frac{e_2 - e_1}{p_2 - p_1}$$

19.-La columna del coeficiente de consolidación  $C_v$  en  $cm^2/seg$ ., se calcula con la fórmula siguiente:

$$C_v = \frac{0.848H_m^2}{t_{90}} \quad cm^2/s$$

20.- El valor de  $e_m$  se calcula efectuando el promedio de las relaciones de vacíos de dos etapas consecutivas.

21.-El valor del coeficiente de permeabilidad media deducida, se obtiene con la fórmula siguiente:

$$K_m = \frac{C_v a_v \gamma_w}{(1 + e_m) * 1000} \quad cm/s$$

22.-La columna  $P_m$  en  $kg/cm^2$ , es el promedio de las presiones de dos incrementos consecutivos.

23.-Las curvas deformación unitaria-tiempo, se obtienen colocando los puntos deformación unitaria acumulativa-tiempo para cada etapa de carga. La deformación unitaria acumulativa, se calcula con la fórmula:

$$\epsilon = \frac{\delta}{2H_1} * 100$$

en donde  $\delta$  esta en mm., es la deformación lineal acumulativa y  $2H_1$ , el espesor inicial de los sólidos.

24.- En un rayado semilogaritmico, se dibujan las curvas: relaciones de vacíos-presiones (en carga y descarga), coeficientes de consolidación-presiones medias, relación de consolidación primaria-presiones medias, con los datos registrados. De la gráfica relación de vacíos-presiones, se obtiene la carga de preconsolidación  $P_1$  en  $kg/cm^2$  de la manera siguiente:

Se toma el punto de máxima curvatura de la rama de carga, por dicho punto se dibuja una línea tangente y otra paralela al eje de las presiones, se traza la bisectriz del ángulo que forman estas dos rectas.

En la parte final de la rama de carga, se traza una asíntota y la abscisa del punto de intersección de esta recta con la bisectriz, define la carga de preconsolidación.

En esta misma gráfica, se obtienen los índices de Compresión  $C_c$  y de expansión  $C_e$  con las siguientes expresiones:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log P_3 - \log P_2} \quad C_e = \frac{e_3 - e_2}{\log P_3 - \log P_2}$$

El valor del índice de compresión, se sustituye en la siguiente ecuación empírica que es la ecuación de la parte recta de la curva. Dicha recta se denomina la curva virgen de la consolidación.

$$e = e_c - C_c \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

donde  $e_c$  es la relación de vacíos correspondiente a  $P_0$  en la etapa de carga (consolidación) y el valor arbitrario para  $P_0$  es de  $1 \text{ kg/cm}^2$ ,  $e$  y  $P$  son variables para un punto cualquiera.

Para la expansión, la recta puede expresarse de este modo:  $e = e_c + \lambda C_c \log_{10} \frac{P}{P_0}$  donde  $e_c$  es la relación de vacíos correspondiente a  $P_0$  en la etapa de descarga (recuperación).

25.-Con los datos relación de vacíos-presiones registrados, se dibujan los puntos en una gráfica de rayado aritmético. Esta curva tiene por objeto determinar gráficamente el coeficiente de compresibilidad  $a_v$ , para cualquier intervalo de presión, empleando la fórmula:

$$a_v = \frac{e_2 - e_1}{P_2 - P_1}$$

26.-Se dibuja la curva deformación unitaria-esfuerzo (presión en nuestro caso), con los datos registrados.

27.-Finalmente, se realiza un rayado semilogarítmico, para relacionar  $k_{20}$ - $e_f$ .



## VIII RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

La resistencia de un suelo al esfuerzo cortante, que en general se expresa mediante la fórmula de Coulomb, es un dato de importancia primordial para conocer el grado de estabilidad de las obras de tierra.

La fórmula de Coulomb es la siguiente

$$S = c + N \tan \Phi$$

Donde

$S$ : resistencia al esfuerzo cortante,  $c$  es cohesión,  $N$  es el esfuerzo normal,  $\Phi$  es el ángulo de fricción interna.

Reemplazando la envolvente de falla de los círculos de Mohr por una recta que se le aproxime, se tendrá que en el diagrama "esfuerzos cortantes—esfuerzos normales", la cohesión es la ordenada al origen de dicha recta o sea la resistencia al cortante cuando no hay esfuerzo normal. El ángulo  $\Phi$  es aquel cuya tangente es la pendiente de la recta, con respecto al eje de esfuerzos normales.

Al ensayar un mismo material pueden obtenerse muy diversos valores tanto de cohesión como de ángulo de fricción interna, pues dependen del estado del material, por lo que respecta a la relación de vacíos con que se haya preparado la probeta, del grado de saturación, de la velocidad del ensaye y del método mecánico con que se haga ésta.

Tratándose de suelos susceptibles de emplearse para formar zonas convencionalmente impermeables, se ha encontrado que el método mecánico más adecuado para los ensayos es la prueba de compresión triaxial. Mediante dicha prueba se consigue reducir el problema tridimensional a un problema plano en que se aplican dos esfuerzos normales en direcciones respectivamente perpendiculares, sin producir concentraciones de esfuerzos en la zona de ruptura.

Esta prueba se lleva a efecto en la cámara de compresión triaxial en la que pueden regularse tanto los esfuerzos normales como el grado de saturación, el grado de consolidación y la velocidad de deformación en una dirección. También puede medirse la presión neutral o presión de poro que es la del fluido que ocupa los espacios intergranulares, presión que se sabe tiene un efecto importantísimo y en ocasiones dominante en la resistencia del material.

Para conocer el comportamiento del material problema en diversos estados, lo cual es necesario para los análisis de estabilidad de cortinas y bordos, cortes, cimentaciones, etc, es necesario llevar a cabo distintos ensayos de compresión triaxial que a continuación se mencionan:

- \* Prueba rápida no drenada
- \* Prueba rápida consolidada
- \* Prueba lenta drenada.

Respecto a las presiones neutrales debe notarse que hay dos criterios: 1° Consiste en considerar necesaria su medición en todas las pruebas de compresión triaxial para deducir del esfuerzo normal en la sección de falla el valor de la presión neutral que por los efectos de consolidación pueda preverse. 2° En este criterio se considera que no es necesaria la medición de presiones neutrales para obtener la resistencia al cortante que se aplica al hacer análisis de estabilidad y que la resistencia medida en la probeta, sin ninguna enmienda, es la que debe aplicarse. Además no se ignora que en el fenómeno de falla intervinieron las presiones neutrales de deformación por ruptura ( se cree que ninguna conexión tienen con las producidas por consolidación).

La SRH adoptó el segundo criterio, debida a que las pruebas de compresión triaxial se harán sin medición de las presiones neutrales, excepto cuando haya necesidad de comprar datos de materiales de los que se conozcan parámetros de resistencia obtenidos mediante la aplicación del primer criterio.

A continuación describiremos la preparación de muestras y los procesos de ensaye para la prueba triaxial en especímenes de 3.6 cm de diámetro, designada T-3.6, que es la prueba de laboratorio más común. Posteriormente se mencionarán pruebas triaxiales en especímenes de otros diámetros.

#### Equipo

- Balanza de torsión de 0.01g de aproximación y capacidad de 500 g.
- Placa de piralina
- Cápsulas
- Calibrador
- Cronómetro
- Molde para compactar probetas de 3.6 cm de diámetro interior y 12 de longitud con separadores de metal y dispositivo para recibir probetas.
- Punzón
- Dispositivo hidráulico y herramienta para compactar probetas de 3.6 cm de diámetro.
- Cámara triaxial sin drenaje para ensayar probetas de 3.6 cm de diámetro y 9.3 de altura.
- Micrómetro con soporte
- Cronómetro
- Tijeras
- Llave de tuercas
- Bandas de hule
- Fundas de hule
- Dispositivo para compresión triaxial.

#### Preparación de las muestras.

Existen dos tipos de muestras que se ensayan en esta prueba: las inalteradas y las remoldeadas.

De la muestra inalterada obtenida en campo, se cortan prismas del tamaño adecuado para obtener probetas cilíndricas de 6 cm de diámetro y 9.3 cm. de altura; esto se logra utilizando el torno y cortador de arco 'Un alambre o bien el 'orlador circular, con la cuchilla. de 3.6 cm. de diámetro.



El método del torno para la obtención de probetas se aplica de la siguiente manera:

1.- De la muestra inalterada se labra un cuyas bases sean paralelas, el cual se coloca en el torno procurando centrarlo y con el cortador de arco, que se desliza apoyando en las soleras del torno, se efectúan los cortes necesarios para ir formando la probeta cilíndrica.

2.- Se hace girar el torno y se sigue cortando de la misma manera hasta lograr dar a la probeta la forma cilíndrica.

3.- Se saca la probeta del torno y se coloca en el enrasador, para darle la altura indicada. El método del cortador circular, quedó descrito en el párrafo 7 inciso a, teniendo como variantes el diámetro de la cuchilla (3.6 cm.) y la altura (aproximadamente 10 cm.).

Las muestras remoldeadas se preparan de la siguiente manera:

1.- Se toman de dos a tres kilogramos de material, el cual ya se ha preparado desmoronándolo y pasándolo por la malla Núm. 4( 4.69 mm.); y se colocan en una charola de lámina con su respectiva identificación.

2.- Se vuelven a desmoronar los grumos del material que pasaron por la malla Núm. 4 (4.69 mm.) con un trozo de madera evitando romper los granos de arena.

3.- Con un atomizador se humedece el material y al mismo tiempo se revuelve con una espátula para lograr humedad uniforme.

4.- Se da al material generalmente la humedad de saturación  $W_G$ , considerando el 95% del peso volumétrico  $\gamma_m$  obtenido en la prueba Proctor. La expresión matemática es:

$$W_G = \frac{1000 \frac{0.95\gamma_m}{S_s}}{0.95\gamma_m}$$

5.- Una vez que el material tiene humedad uniforme y poco mayor que la óptima de la Proctor, se introduce en un recipiente de vidrio con tapa para evitar pérdidas de humedad y deje reposar durante 24 horas mínimo para que la humedad su uniformice. Al mismo tiempo se toma una muestra, para obtener el contenido de humedad.

6.- Los requisitos que deben satisfacerse para la manufactura de probetas remoldeadas son que el peso volumétrico fluctúe del 95% al 100% del valor obtenido en la prueba Proctor, que sea igual y uniforme a la compactación en cada una de las 5 capas

Una vez terminada la probeta, se saca del molde, se separan las capas teniendo cuidado de no perder el orden de colocación, se mide su altura y su diámetro, se pesan por separado dentro de una cápsula y todos los valores se anotan en el registro.

Del material guardado en el vitriolero, se toma una muestra para determinar su contenido inicial de humedad.

7.-Se introducen, las cápsulas en el horno a 100° C, durante 18 hrs mínimo, para su secado, después de las cuales se sacan del horno colocándolas en un desecador para que se enfríen, ya frías se pesan y se anotan como peso seco + tara

8.-Se efectúan todos los cálculos, Si la compactación de la probeta no cumple con los requisitos prefijados, se debe de repetir los tanteos, las veces que sean necesarios.

9.-Una vez encontrada la presión y el tiempo adecuados, se procede a compactar las probetas necesarias para el ensayo, teniendo en cuenta que los discos metálicos sólo se usan en los extremos, para evitar que se adhiera el material en la base del molde o en el vástago. Después de haber compactado cada capa, con un punzón se pica la superficie de la misma a fin de lograr adherencia entre esta y la capa siguiente.

Debe tenerse la precaución de ir haciendo las probetas a medida que se ensayan, para así evitar alteraciones como pérdida de humedad, hinchamiento, etc.

#### Procedimiento

#### RÁPIDAS O SIN DRENAJE.

1.-Una vez obtenida la probeta (inalterada o remodelada), se coloca cuidadosamente en posición horizontal en un aplaca de lucita o de vidrio, se mide su altura (h) y diámetro (d), con un calibrador cuyo vernier aproxime al 0.01, estos valores se deben de registrar.

2.- La probeta se coloca dentro de una cápsula numerada y previamente tarada, se pesa en una balanza de torsión que aproxime al 0.01g y se anota como *peso probeta húmeda antes de la prueba + tara*.

3.-Sobre la base inferior de la cámara triaxial, se coloca la probeta en posición vertical.

4.-En el cabezal se ha colocado previamente la funda de hule sujeta con una lija y este conjunto se pone sobre la probeta, deslizando la funda hacia abajo.

5.-El extremo inferior de la funda de hule, se amarra sobre la base inferior de la cámara con otra liga.

6.-Se verifica que la probeta este bien centrada, se coloca el tubo de lucita sobre el empaque de la base de bronce de la cámara y se pone la tapa teniendo la precaución de levantar el vástago para no tocar la probeta.

7.-Se cierra herméticamente la cámara, ajustando las tuercas a los tornillos de que esta provista, procurando que las dos bases queden paralelas y pueda coincidir el centro del balero que esta alojado en el cabezal con la espiga del vástago que transmite la carga axial.



8.-La cámara se coloca en la báscula y se centra el vástago en el balero del marco de carga, se hace bajar el marco o yunque hasta que este a punto de hacer contacto.

9.-Se coloca el micrómetro en el soporte de la cámara y apoyado sobre el marco, procurando que quede en posición vertical.

10.-Se introduce el agua dentro de la cámara y se aplica la presión lateral con la cual se va a ensayar el espécimen. Considerando que todas las llaves del dispositivo para compresión triaxial estén cerradas.

11.-Una vez dada la presión lateral a la cual se va a ensayar el espécimen, la báscula se pone en cero. Se deben de anotar las lecturas iniciales de la báscula y del micrómetro.

12.-En el control de marcha, se fija la velocidad de ruptura a la cual se va a someter el espécimen durante el ensayo y que, generalmente, es de 1 mm./min.

13.-Se ponen en marcha, el dispositivo eléctrico que elimina la fricción del vástago y el mecanismo de carga, tomando lecturas simultáneas de la báscula y del micrómetro, con la frecuencia que sea necesaria, para definir la curva deformación unitaria-esfuerzo.

14.-Las lecturas deben suspenderse cuando la carga después de haber llegado a un máximo, empiece decrecer (materiales arenosos) o bien cuando la deformación corresponda a un 20% con respecto a la altura inicial (materiales plásticos).

15.-Se procede a desmontar el espécimen, para ello se lee nuevamente la presión lateral y se anota como presión lateral final, en seguida se deja pasar aire para regresar el agua de la cámara al tanque. Una vez terminado se comienza a desarmar la cámara.

16.-Se desliga el espécimen de las bases, se le quita la funda y se pesa en la misma cápsula en que se había pesado antes de la prueba, anotando el valor como peso probeta húmeda después de la prueba + tara.

17.-Se mide nuevamente la altura  $h_f$  y si la falla fue del tipo plástico, se determina la zona de falla tomando dos diámetros perpendiculares en tres planos horizontales, procurando que uno de estos planos este en la sección más deformada. Se hace el ensayo del espécimen deformado.

18.-Se introduce al horno a 100 °C para su secado, durante 18 horas mínimo; después se saca, se pone dentro de un desecador para que se enfríe, se pesa y se anota en el renglón de peso muestra seca + tara.

Este procedimiento se repite en 4 probetas del material bajo estudio, con diferentes presiones laterales, para definir la envolvente de Mohr. Si 4 probetas no son suficientes se probarán las que se necesiten.

#### Cálculo

1.-Con los datos registrados, se calcula peso del agua  $W_w$  y de los sólidos  $W_s$ .



2.- Se obtiene el volumen  $V$  de la Probeta con el valor del peso de los sólidos  $W_s$  dividido entre la densidad de los mismos  $S_s$ , se obtiene el volumen de los sólidos  $V_s$  que restado al volumen total nos da el volumen de vacíos  $V_v$ .

3.- Se calcula el contenido de humedad en % y la humedad testigo, siguiendo las fórmulas anotadas en el registro.

4.- La relación de vacíos  $e=V_v/V_s$ .

5.-El grado de saturación  $G$  en % se obtiene dividiendo el peso del agua  $W_w$ , entre el volumen de vacíos  $V_v$  y multiplicando por 100:

$$G = \frac{W_w}{V_v} 100$$

6.- Cuando el espécimen no se deforma en toda su longitud, se calcula su diámetro medio  $d_m$  de la siguiente manera:

Se suman los diámetros de los extremos y dos veces los del centro, dividiendo todo entre 8.

7.-Se calcula la deformación lineal en mm, restando la lectura inicial del micrómetro a cada una de las lecturas subsiguientes tomadas durante la prueba.

8.-La deformación unitaria  $\varepsilon$  en %, se obtiene de la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{\delta_x}{h} 100$$

Donde  $\delta_x$  es la deformación lineal en mm, para un tiempo cualquiera y  $h$  en cm, es la altura inicial del espécimen.

9.- El área corregida se puede obtener de dos maneras:

a) Empleando la deformación unitaria si la falla no es plástica, con la expresión matemática:

$$A_{corr} = \frac{A_i}{1 - \frac{\varepsilon\%}{100}} \text{ cm}^2$$

En donde  $A_{corr}$  es el área corregida,  $A_i$  es el área inicial,  $\varepsilon$  la deformación unitaria en %.

b) Empleando el diámetro deformado, cuando la falla es plástica:

$$A_{corr} = A_i + \frac{(A_f - A_i)}{\delta_T} \delta_x \text{ cm}^2$$

En donde  $A_{corr}$  es el área corregida,  $A_i$  es el área inicial,  $A_f$  es el área final, se obtiene del diámetro  $d_m$ ,  $\delta_T$  la deformación lineal total,  $\delta_x$  la deformación en cualquier tiempo.

10.- El esfuerzo  $\sigma_1-\sigma_m$  en kg/cm, se obtiene dividiendo la carga entre el área corregida.

11.- Se dibuja la grafica de deformación unitaria-esfuerzo.



12.-Se trazan los círculos de Mohr con los datos correspondientes, debiendo elegir una escala de esfuerzos, a partir del origen y sobre el eje horizontal se lleva el valor de la presión lateral  $\sigma_m$  y desde este punto se marca el valor del esfuerzo principal de ruptura  $\sigma_1-\sigma_m$ , que viene a ser el diámetro del círculo; por tanto, con centro en el punto medio del segmento así determinado se traza el semicírculo correspondiente.

13.-Una vez trazados los semicírculos, se dibuja la envolvente que mejor se ajuste a ellos. Dicha línea representa aproximadamente la variación del esfuerzo cortante en función de las presiones normales aplicadas.

14.- El ángulo de fricción  $\Phi$  es el que forma la envolvente con la horizontal; y el valor de la cohesión  $c$ , esta dado por la ordenada al origen de dicha envolvente, medida a la misma escala a la que se trazaron los círculos.

15.-Se calculan los promedios que se indican en la parte superior izquierda del mismo registro y se anotan los datos correspondientes a la prueba Proctor, densidad y velocidad de ruptura.

#### PRUEBA RÁPIDA-CONSOLIDADA

Una vez obtenida la probeta (inalterada o remodelada) se procede como sigue:

1.-Con los datos registrados, se calcula peso del agua  $W_w$  y de los sólidos  $W_s$ .

2.- Se obtiene el volumen  $V$  de la Probeta con el valor del peso de los sólidos  $W_s$  dividido entre la densidad de los mismos  $S_s$ , se obtiene el volumen de los sólidos  $V_s$  que restado al volumen total nos da el volumen de vacíos  $V_v$ .

3.- Se llena de agua la pipeta y se conecta con las bases de la muestra; se procede a desalojar todo el aire del sistema, incluyendo el de las piedras porosas de las bases.

4.-La probeta se protege con una funda de papel filtro saturado y dos discos del mismo papel saturado en sus bases.

5.-Se procede a montar la probeta en la cámara, igual como en la prueba sin drenaje, desde el paso 3 hasta el 7.

6.-Se llena de agua la cámara.

7.-Se coloca la cámara en el banco de consolidación, conectándole la manguera del sistema de confinamiento, se pone el micrómetro procurando que quede en posición vertical.

8.-Para aplicar la presión lateral se emplea la celda de presión constante. Este dispositivo, basado en el principio de la prensa hidráulica, compensa automáticamente los cambios de presión de cámara producidos por la consolidación del espécimen o por pequeñas fugas en el sistema de confinamiento. Para poner la celda a presión, se pone el contrapeso del pistón. La conexión entre la celda y la cámara triaxial debe permanecer



cerrada. Se induce en la celda una presión ligeramente mayor que la presión de confinamiento buscada, con objeto de hacer subir el pistón. Estando el pistón en la posición deseada, se aísla la celda y se conecta con la cámara triaxial abriendo la llave. Este sistema compensa los cambios de presión por 48 horas o más.

9.-Se hacen las lecturas iniciales; del micrómetro y de la bureta, se abren las llaves del control de flujo instaladas en la cámara y al mismo tiempo se pone en marcha el cronómetro, tomando una serie de lecturas simultáneas, variación de volumen-tiempo y deformación-tiempo, todas estos datos deben anotarse en el registro y deben efectuarse rápidamente.

10.-Con los datos deformación-tiempo y variación de volumen desalojado-tiempo, se construye una grafica en rayado semi-logarítmico.

11.-Cuando se han definido las graficas de consolidación, se da por terminado el proceso, cerrando las llaves de control de flujo.

12.-Se cierra la llave se coloca el pasador para detener el vástago, se abate la presión del sistema, se desconecta la manguera que viene del tanque de agua y se quita el micrómetro.

13.-Se traslada la cámara ala báscula, se conecta el micrómetro y mediante el sistema de presión, se aplica una presión igual a la que se usó en la etapa de consolidación.

14.-Una vez dada la presión lateral y nivelada la báscula, se quita el pasador del vástago, se abre la llave.

15.- En el control de marcha, se fija la velocidad de ruptura a la cual se va a someter el espécimen durante el ensayo y que, generalmente, es de 1 mm./min.

16.-Se ponen en marcha, el dispositivo eléctrico que elimina la fricción del vástago y el mecanismo de carga, tomando lecturas simultáneas de la báscula y del micrómetro, con la frecuencia que sea necesaria, para definir la curva deformación unitaria-esfuerzo.

17.- Las lecturas deben suspenderse cuando la carga después de haber llegado a un máximo, empiece decrecer (materiales arenosos) o bien cuando la deformación corresponda a un 20% con respecto a la altura inicial (materiales plásticos).

18.-Se procede a desmontar el espécimen, para ello se lee nuevamente la presión lateral y se anota como presión lateral final, en seguida se deja pasar aire para regresar el agua de la cámara al tanque. Una vez terminado se comienza a desarmar la cámara.

19.-Se desliga el espécimen de las bases, se le quita la funda y se pesa en la misma cápsula en que se había pesado antes de la prueba, anotando el valor como peso probeta húmeda después de la prueba+ tara.

20.-Se mide nuevamente la altura  $h_f$  y si la falla fue del tipo plástico, se determina la zona de falla tomando dos diámetros perpendiculares en tres planos horizontales,



procurando que uno de estos planos este en la sección más deformada. Se hace el croquis del espécimen deformado.

21.-Se introduce al horno a 100 °C para su secado, durante 18 horas mínimo; después se saca, se pone dentro de un desecador para que se enfríe, se pesa y se anota en el renglón de peso muestra seca + tara.

Cuando las probetas inalterada o remoldeadas, no estén saturadas, se someten antes de efectuar la etapa de consolidación, a un proceso de saturación utilizando la misma cámara, a la cual se le aplica una carga de agua por medio de la bureta conectada a la base inferior y permitiendo la expulsión por la parte superior.

#### Cálculo

El cálculo se efectúa siguiendo los mismos pasos indicados en la prueba rápida, después de tomar en consideración las medidas modificadas por efecto de la consolidación, en la forma siguiente:

1.-A la altura inicial  $h$ , se le resta la deformación total sufrida por la probeta por la etapa de consolidación para obtener  $h_c$ .

2.-La variación total del volumen  $\Delta V$  se obtiene con la siguiente expresión, siempre y cuando el espécimen tenga una saturación del 100%:

$$\Delta V = \frac{\omega_i - \omega_f}{100} W_s$$

Donde  $\omega_i$  es el contenido de humedad inicial,  $\omega_f$  el contenido de humedad final y  $W_s$  el peso de sólidos.

3.-El volumen corregido  $V_c$  se obtiene así:

$$V_c = V - \Delta V$$

4.-El área inicial de ruptura es:

$$A_i = \frac{V_c}{h_c} \quad \text{cm}^2$$

Se hace notar que en ésta prueba se deben calcular las condiciones inicial y finales del espécimen, es decir  $\omega$ ,  $e$ ,  $G$ .

#### PRUEBA LENTA

En esta prueba se sigue el mismo procedimiento indicado en la triaxial rápida-consolidada, hasta que finalice la etapa de consolidación y se continua de la siguiente manera:

1.-Sin trasladar la cámara y permaneciendo las llaves de control de flujo abiertas, se aplica la primera carga triaxial y se leen el micrómetro y la bureta a intervalos de tiempos conocidos, hasta que las deformaciones y variaciones volumétricas sean prácticamente nulas.





2.-Se aplican sucesivamente la segunda, la tercera y demás cargas, operando en igual forma que la explicada en el paso anterior, hasta provocar la falla del espécimen. Para hacer un programa de las cargas axiales que se usarán en el ensayo, es necesario tener una idea de la que produce la falla, por otras pruebas y por la forma de la curva de cargas-deformaciones

3.-Para cada incremento de carga axial, se dibujan las curvas deformaciones axiales-tiempo y variaciones volumétricas-tiempos; se calculan los contenidos de agua y relaciones de vacíos.

4.- Todas las operaciones descritas se repiten para otras presiones laterales. Con los valores de las cargas axiales de ruptura y presiones laterales, se trazan los círculos de Mohr y la envolvente respectiva.

#### PRUEBA TRIAXIAL T-15

En esta prueba se utilizan espécimen de 15 cm de diámetro y una relación de esbeltez de 2.5 a 3. Tiene por objeto ensayar agregados gruesos, como gravas y arenaas o mezclas; de tamaño máximo de partícula igual a  $\frac{1}{4}$  del diámetro.

##### *Equipo*

Molde para compactar, funda de hule, varilla y prensa hidráulica para compactar. Cámara de compresión triaxial, compresora para aplicar cargas axiales, dispositivo para dar presión lateral, grúa viajera, báscula y herramientas.

El procedimiento para estos especimenes es igual a los anteriormente explicados.

#### PRUEBA TRIAXIAL T 38

En esta prueba se estudian especimenes de 38 cm de diámetro y aproximadamente 80 cm de altura, con partículas del orden de 9.5 cm máximo. El funcionamiento de la cámara y el procedimiento de ensaye son análogos a los anteriormente explicados.

#### MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE PORO.

En las pruebas de compresión triaxial y de consolidación, se puede determinar el valor de la presión de poro (neutral), por medio de un dispositivo que consta de una aguja conectada a un tubo capilar, el cual esta unido por el otro extremo a un sistema de control, el sistema se llena con agua desaireada.

#### PRUEBA GONIOMÉTRICA

Para esta prueba se emplea un dispositivo con el cual determinamos el ángulo de fricción interna  $\Phi$  cuando se trata de materiales permeables no cohesivos.

El dispositivo se basa en el siguiente principio: cuando ocurre el deslizamiento de dos volúmenes semicilíndricos que están presionados uno contra otro, a través del material para ensayar, mediante cargas que siempre se conservan verticales, el ángulo que forma



la superficie de corte con la horizontal  $\theta$  corresponde al de fricción interna  $\Phi$ ; la prueba se lleva a cabo en la siguiente forma:

1.-Se arma el cilindro con sus piezas de montaje removibles. Se compacta el material en el propio cilindro para obtener la relación de vacíos deseada para la prueba. Para hacer la prueba con el material saturado se procederá a dejarlo en estado de sumergencia bajo una carga hidrostática de no mas de un metro antes de probarlo.

2.- Se coloca el cilindro en la posición del eje horizontal inicial en el ensayo y se desmontan las piezas removibles con lo que queda el par de semicilindros ligado únicamente por medio del material bajo estudio.

3.-Se aplica la carga vertical que se haya estimado conveniente para la obra específica de que se trate y se procede a hacer girar el cilindro, conservando dicha carga, a la velocidad angular de  $5^\circ$  por minuto, haciendo lecturas simultaneas de ángulo y deformación transversal relativa entre los dos semicilindros. Se recomienda anotar a cada dos y medio grados de rotación.

4.- Con el registro de ángulos y desplazamientos se construye un grafica en el papel semi logarítmico. El ángulo de fricción interna corresponderá al valor para que la curva tienda a ser asintótica con la horizontal.