



5  
2024  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ A R A G O N ”

“ DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD Y EXPANSION  
DE SUELOS CON DIFERENTES GRADOS DE COMPACTACION  
Y HUMEDAD, PARA SU USO EN BORDOS DE CONTENCION  
DE OBRAS PEQUEÑAS ”

T E S I S

Que para obtener el Titulo de:

INGENIERO CIVIL

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Presenta:

ANGEL DOMINGO CARRERA MORENO

México, D. F. 1991



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# I N D I C E

	PAG.
I. INTRODUCCION	1
II. PERMEABILIDAD EN SUELOS, PRUEBAS DE LABORATORIO Y DE CAMPO PARA LA OBTENCION DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	
II.1 Introducci3n.	4
II.2 Permeabilidad.	5
II.3 Factores que Afectan en la Permeabilidad de los Suelos.	7
II.4 Velocidad de Descarga y Velocidad de Filtraci3n.	12
II.5 Pruebas de Laboratorio.	14
II.6 Pruebas de Campo.	39
III. ARCILLAS EXPANSIVAS Y PRUEBAS DE LABORATORIO	
III.1 Introducci3n.	56
III.2 Hinchamiento de las Arcillas.	57
III.3 Identificaci3n de los Minerales Constituyentes.	61
III.4 Ensayo de Identificaci3n basados en las Propiedades Indice y los L3mites de <u>Con</u> sistencia.	63
III.5 Pruebas Directas.	68
IV. PLANEACION DE LA INVESTIGACION	
IV.1 Introducci3n.	81
IV.2 Selecci3n de Material para el Estudio.	87

IV.3 Pruebas de Laboratorio.	89
V. REALIZACION DE LAS PRUEBAS, REGISTRO E INTER - PRETACION DE LOS DATOS	
V.1 Registro e Interpretación de los Datos.	104
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
BIBLIOGRAFIA	128

## CAPITULO I

## INTRODUCCION

El ingeniero civil es un profesionalista que está capacitado - para dar solución a diferentes tipos de problemas, relacionados - con Estructuras, Obras Hidráulicas, Mecánica de Suelos, etc.

La geotecnia es una de las ramas más importante para el ingeniero civil, porque todas las obras que proyecta se construyen sobre la corteza terrestre ó utilizando los materiales extraidos de ella. Los tipos de suelos de la corteza se comportan de forma diferente, ya que se trata de todo tipo de material, desde un relleno de desperdicio, hasta arenisca parcialmente cementada o lutitas - suaves.

Cuando los suelos soportan cargas se alteran sus características internas, esto es debido a que el suelo se somete a otro estado de esfuerzos, lo que se modifica es la relación de vacíos y - la presión ejercida, al variar estos parámetros su comportamiento del suelo es diferente; por lo que es indispensable realizar los - estudios de Mecánica de Suelos antes de construir cualquier obra, - ya que al no llevarse a cabo estos estudios por más que esté bien-diseñada estructuralmente la obra, correra el riesgo de fallar en la cimentación y como consecuencia podrá llegar a tener también - graves fallas en la estructura, ocasionando pérdidas de recursos - económicos y hasta pérdida de vidas.

Los principales problemas que se presentan en la geotecnia - son:

**1.- RESISTENCIA ULTIMA Y DE TRABAJO.**

La resistencia última es la carga máxima que permite el suelo; es decir cuando llega a causar la roptura por corte total del suelo en la vecindad de la fundación.

Resistencia de trabajo es lo que se requiere que cargue el suelo, teniendo un factor de seguridad, dicho factor es el que ha ce disminuir la carga última.

## 2.- DEFORMACIONES.

Son los cambios de volumen que se producen al aplicarle carga al suelo, que se desarrolla en el transcurso del tiempo; que pueden ser asentamientos ó levantamientos.

## 3.- HIDRAULICOS.

Permeabilidad, es la facilidad que tiene el agua al atravesar en el suelo.

Presión hidrostática, es la presión que se genera en el suelo provocado por el agua.

Flujo laminar y turbulento, un flujo laminar es cuando las líneas de flujo permanecen sin juntarse entre sí en toda su longitud.

El flujo turbulento es cuando las líneas de flujo permanecen unidas entre sí en toda su longitud, estableciendo este flujo al aumentar la velocidad.

Para disminuir los riesgos de fallas que podrían ocasionar cualquier obra civil, es así como surge la necesidad de realizar pruebas de laboratorio y dar soluciones antes de construir la obra, basándose de los resultados obtenidos.

En el trabajo denominado "DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD Y EXPANSION DE SUELOS CON DIFERENTES GRADOS DE COMPACTACION Y HUMEDAD, PARA SU USO EN BORDOS DE CONTENCIÓN DE OBRAS PEQUEÑAS".

Es para conocer el comportamiento del suelo en contacto con agua en lo que se refiere a permeabilidad y expansión, cuando el material es compactado a diferentes grados (90 %, 95 %, 100 %, 110 %) y diferentes humedades en cada uno de ellos.

Las conclusiones que se lleguen a esta tesis, sirvan de apoyos a las construcciones de los bordos de contención de las obras pequeñas, como son: canales, canales de riego, represas, etc.

El objetivo primordial de este trabajo, es determinar la humedad con que se va a compactar el suelo y el grado de compactación más adecuado, para que el bordo sea menos permeable y que tenga una expansión mínima.

En el capítulo II, permeabilidad en suelos, se menciona la ley que rige, las diferentes velocidades, los factores que influyen; los diferentes tipos de pruebas que se realizan en el laboratorio y las pruebas más usadas en el campo.

En el capítulo III, arcillas expansivas y pruebas de laboratorio, se explican las causas del hinchamiento en relación a los minerales constituyentes y se describen los ensayos para identificar la expansión en las arcillas, y las pruebas que se realizan para determinar el porcentaje de expansión y la presión de expansión.

En el capítulo IV, planeación de la investigación, se da un panorama general sobre compactación, se establece el objetivo y critérios para determinar la permeabilidad y la expansión a diferentes grados de compactación y humedad, se describen las pruebas índice y mecánicas.

En el capítulo V, realización de las pruebas, registro e interpretación de los datos, se tienen los resultados y análisis comparativos por medio de cuadros y gráficas.

En el capítulo VI, conclusiones y recomendaciones.

## C A P I T U L O   I I

### PERMEABILIDAD EN SUBSUELOS, PRUEBAS DE LABORATORIO Y DE CAMPO PARA LA OBTENCION DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

#### II.1 INTRODUCCION

Un material es permeable cuando contiene vacíos continuos. - Estos vacíos existen en todos los suelos, incluyendo las arcillas más compactas, y en todos los materiales de construcción no metálicos, comprendido el granito sano y la pasta de cemento, dichos materiales son permeables. La circulación de agua a través de la masa de ellos obedecen aproximadamente a leyes idénticas, de modo que la diferencia entre una arena limpia y un granito sano es sólo una diferencia de magnitud.

La permeabilidad en los suelos, es una de las características que más preocupa al ingeniero cuando diseña obra que va a contener agua, pues toda fuga de agua es, en principio, una pérdida indeseable; y tiene un efecto decisivo sobre el costo y las dificultades a encontrar en muchas operaciones constructivas. Por ejemplo, las excavaciones a cielo abierto en arena bajo agua.

El agua ejerce presión sobre el material poroso a través de la cual circula, esta presión se le conoce con el nombre de presión de filtración, puede llegar a ser muy alta.

La permeabilidad depende fundamentalmente del tamaño promedio de los poros, como también dependen de la distribución de dimensiones de partículas, forma de la misma y estructura del suelo. En general, cuando las partículas son más pequeñas, la dimensión media de los poros es menor, y la permeabilidad es mínima. Cuando un suelo de grano grueso tiene un pequeño porcentaje de finos produce un valor de permeabilidad más pequeña que el del mismo suelo sin finos. Para un suelo determinado, la permeabilidad es una función de la relación de huecos.

## II.2 PERMEABILIDAD

EL CONCEPTO DE PERMEABILIDAD EN SUELOS.- Es la facilidad con que se mueve el agua a través de un suelo.

## LEY DE DARCY Y COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

En 1856, Henri Darcy estableció una ley que rige el flujo del agua a través de medios porosos de mucha importancia en la mecánica de suelos. Darcy investigó el flujo de agua a través de filtros ensayando con materiales térreos, con un dispositivo de diseño especial, como se muestra en la Fig. II.1, Darcy determinó que para velocidades muy pequeñas, el gasto queda expresado por:

$$Q = KA\lambda \text{ ( cm}^3\text{/seg )} \text{----- II.1}$$

En donde:

A = Área de la sección transversal del filtro.

K = coeficiente de permeabilidad.

Q = volumen de agua que fluye por unidad de tiempo.

$\lambda$  = gradiente hidráulico del flujo, obteniendo de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

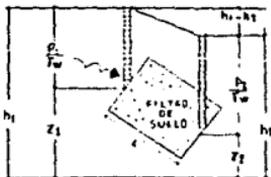


Fig. II.1

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DE DARCY

La altura piezométrica  $h$  es la carga de la elevación  $Z$ , más - la carga de presión ( $p/\rho g$ ). La carga de velocidad se desprecia, debido a que las velocidades a través del medio poroso son pequeñas.  $h_1 - h_2$  representa la pérdida de energía en el desplazamiento  $L$ ; esta energía se transforma en calor.

En la Fig. II.1 el agua escurre de un punto a menor presión a otro a mayor, la carga hidráulica total es la suma de los dos factores anteriores mencionados y no sólo de la presión; el gradiente de presión del flujo horizontal es proporcional al gradiente hidráulico y el flujo ocurre en el sentido de las presiones descendentes.

El gasto se establece que:

$$Q = A V \text{ ----- II.2}$$

En donde:

$A$  = área del conducto.

$V$  = velocidad del flujo.

Sustituyendo la expresión II.1 en II.2, la velocidad queda:

$$V = K \lambda \text{ ----- II.3}$$

La velocidad del flujo es directamente proporcional al gradiente hidráulico; esto nos indica que la aplicación de la ley de Darcy, es para flujo laminar. Darcy experimento sus filtros de arenas finas, se deduce que en estos suelos el flujo es laminar. En suelos más finos como mezclas de limos y arcillas o arcillas puras, las velocidades del agua son pequeñas, por lo tanto también será laminar. Quedando excluidas de esta ley los materiales gruesos como son: gravas limpias, cantos rodados etc.

En las expresiones anteriores, aparece una constante física de proporcionalidad,  $K$ , llamada coeficiente de permeabilidad del suelo, sus unidades son a las correspondientes a la de una veloci-

dad ( $L/T$ ),  $i$  es un concepto adimensional, estos términos se utilizan para definir el coeficiente de permeabilidad de un suelo como la velocidad del agua a través del mismo, cuando esta sujeta a un gradiente hidráulico unitario.

El valor numérico de  $K$  depende de las propiedades físicas del suelo y, también de algunos factores, tales como temperatura y otros. El valor de  $K$ , indica la mayor o menor facilidad con que el agua fluye a través del suelo.

### II.3 FACTORES QUE AFECTAN EN LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS

Los principales factores son:

- 1.- La relación de vacíos del suelo.
- 2.- La temperatura del agua.
- 3.- La estructura y estratificación del suelo.
- 4.- La existencia de agujeros, fisuras etc. en el suelo.

#### Influencia de la relación de vacíos del suelo

Cuando un suelo es comprimido o vibrado, el volumen de sus elementos sólidos permanece constante, mientras que el volumen de los vacíos disminuyen, por lo tanto la permeabilidad del suelo se hace pequeña.

La Fig. II.2 indica la influencia que la relación de vacíos ejerce sobre la permeabilidad. Las abscisas representa la relación de vacíos, y las ordenadas la relación  $K/K_{0.85}$  entre el coeficiente de permeabilidad  $K$  del suelo a una relación de vacíos dada  $e = 0.85$ . La curva llena es válida para arenas finas y medianas limpias con granos de buena cubicidad. Esta curva puede ser expresada por la ecuación de A. Casagrande.

$$K = 1.4 e^2 K_{0.85}$$

Si la arena contiene un alto porcentaje de partículas en formas de escamas, como son las partículas de mica, la correspondencia entre

e y  $K/K_{as}$  se asemejan a la curva punteada de la Fig. II.2.

Los suelos de granos finos, la proporción de partículas en forma de escamas es distinta para los diferentes suelos, las curvas que relacionan e y  $K/K_{as}$  son también distintas.

Cuando el suelo contiene burbujas de aire, el tamaño de las burbujas disminuyen al aumentar la presión del agua, aumentando el coeficiente de permeabilidad con la carga hidráulica. En las arcillas que contienen agujeros de raíces o fisuras abiertas, la circulación del agua trae casi siempre aparejada una erosión interna y las partículas erosionadas van a llenar poco a poco los pasajes más estrechos con respecto al valor inicial. Por ello, la ley de Darcy no es aplicada mas que en el caso en que el volumen y la forma de los canales de escurrimiento son independientes de la presión y del tiempo.

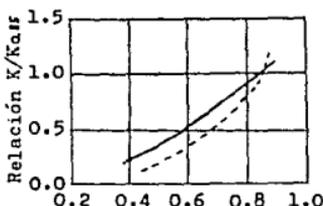


Fig. II.2 Relación entre la permeabilidad y la relación de vacíos de una arena graduada (línea llena) y de un suelo con elementos escamosos (línea punteada).

#### Influencia de la temperatura del agua

La temperatura del agua afecta principalmente en la viscosidad. Es conveniente establecer una base de comparación del coeficiente de permeabilidad refiriéndolo a la temperatura de 20 °C si se conoce el valor  $K_t$ , a cualquier temperatura  $T$ , su valor  $K_{20}$  a 20 °C será:

$$K_{20} = \frac{V_t}{V_{20}} K_t$$

Donde  $V$  es la viscosidad dinámica del agua. Los valores de  $V_t/V_{20}$  para diferentes temperaturas, aparecen en la gráfica de la lámina II.1, y tabulados en la tabla II.1. Es necesario observar que la ecuación citada no es válida en el caso de arcillas y otros suelos muy finos, la viscosidad del agua de estos suelos es función no solamente de la temperatura, sino también de las dimensiones de los poros del material.

#### DISMINUCION DE LA VISCOSIDAD DEL AGUA CON LA TEMPERATURA

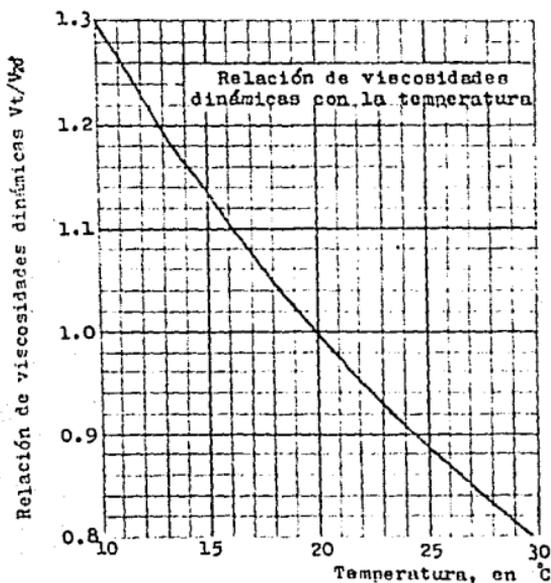


Lámina II.1

GRADOS C	Vt	$\frac{Vt}{V_{20}}$
10.0	1.3077	1.30119
11.0	1.2713	1.26497
12.0	1.2363	1.23014
13.0	1.2028	1.19681
14.0	1.1709	1.16507
15.0	1.1404	1.13472
16.0	1.1111	1.10557
17.0	1.0828	1.07741
18.0	1.0559	1.05064
19.0	1.0299	1.02477
20.0	1.0050	1.00000
20.2	1.0000	0.99502
21.0	0.9810	0.97611
22.0	0.9579	0.95313
23.0	0.9358	0.93114
24.0	0.9142	0.90965
25.0	0.8937	0.88925
26.0	0.8737	0.86935
27.0	0.8545	0.85024
28.0	0.8360	0.83184
29.0	0.8180	0.81397
30.0	0.8007	0.79671

Tabla II.1 Viscosidades de  
10° a 30° C y relaciones

$$\frac{Vt}{V_{20}}$$

Vt = Viscosidad del agua a T °C  
V<sub>20</sub> = Viscosidad del agua a 20 °C

#### Influencia de la estructura y estratificación

En un mismo suelo, las permeabilidades son diferentes en estado inalterado y remoldeado, aun cuando la relación de vacíos sea la misma en ambos casos; esto es debido a los cambios en la estructura y estratificación del suelo inalterado o la combinación de los dos factores.

Pueden presentarse variaciones muy notables en la permeabilidad de los suelos debido a que el remoldeo quedan partículas libres y cuando el agua fluye las mueve y reacondona hasta obturar los canales; ó también estas partículas son arrastradas al exterior de la muestra provocando la turbidez del agua de salida. El suelo es una mezcla de materiales provenientes de estratos de características diferentes; es por lo tanto inevitable probar muestras remoldeadas.

Los fenómenos de formación de natas internas en los poros y la segregación de burbujas de aire, afectan también la permeabilidad, e incluso que el suelo garantice que no pueden formarse esas natas limosas. En general los coeficientes de permeabilidad comprendido entre  $10^{-5}$  y  $10^{-3}$  cm/seg. son los que representan el peligro de permitir el desplazamiento de las partículas por efectos de las fuerzas de filtración.

Las muestras inalteradas algunas veces presentan inestabilidad interna bajo el flujo, característica que es de mucha importancia en la cimentación de presas.

Es necesario determinar el coeficiente de permeabilidad tanto en dirección paralela, como normal a los planos estratificados. Cuando los estratos son muy gruesos, puede determinarse la permeabilidad para cada estrato más o menos homogéneos y así determinar el coeficiente de permeabilidad medio en cada dirección, para la combinación de estratos.

#### Influencia de la presencia de agujeros, fisuras, etc.

Debido a las heladas, ciclos alternados de humedecimiento y secado, efectos de vegetación y pequeños organismos, etc., hacen cambiar la permeabilidad de los suelos, convirtiendo a la arcilla más impermeable en material poroso.

Por otro lado el ingeniero a veces es obligado a desviar la circulación natural del agua contenida en los suelos para enviarla a zanjas o pozos dispuestos al efecto o bien encauzarla hacia conductos subterráneos. Los pozos de drenaje son generalmente revestidos con caños perforados y los conductos consisten en cañerías con sus juntas abiertas o en caños perforados. Entre el suelo natural y los caños se tiende una capa de material grueso para que funcione como filtro.

El material empleado para este filtro debe de reunir ciertas condiciones granulométricas. Si los vacíos del material son mayores que las partículas finas del suelo adyacente en contacto con el filtro, dichas partículas son poco a poco arrastradas a los intersticios del mismo, si los vacíos del filtro son del mismo tamaño que los del suelo, el filtro puede ser poco a poco lavado por arrastres hacia el conducto subterráneo. Ambas condiciones son igualmente indeseables. Para evitarlas, el filtro debe de ser de un material cuya granulometría ha de ajustarse a ciertos requerimientos.

#### II.4 VELOCIDAD DE DESCARGA Y VELOCIDAD DE FILTRACION

Regresando a las ecuaciones II.1 y II.2, la velocidad  $V$  que se ha venido considerando, no representa ninguna velocidad real en la que el agua fluye a través del filtro que llena la conducción mostrada en la Fig. II.3 esta velocidad, conocida como de descarga se refiere a la conducción total del área, no es la que se refiere realmente para fluir el agua.

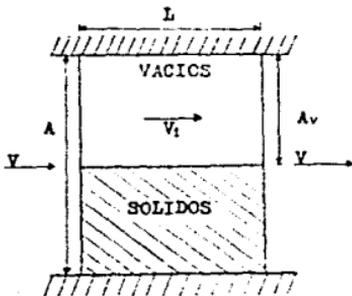


Fig. II.3

Esquema que diferencia entre la velocidad de descarga y la velocidad de filtración.

Es necesario saber lo que pudiera ser la velocidad real del agua a través del suelo, si se acepta que el flujo sólo es posible a través de los vacíos. Considerando el esquema anterior, se ve que si se define una velocidad llamada de filtración ( $V_f$ ) que corresponda a esta última consideración, debe tenerse por continuidad del gasto:

$$A_v V_f = A V \quad \text{II.3}$$

de donde 
$$V_f = \frac{A}{A_v} V \quad \text{II.4}$$

si se toma en cuenta una dimensión unitaria normal al plano del papel y se recurre a la definición de la relación de vacíos  $e$ , puede escribirse:

$$e = \frac{A_v}{A - A_v} \quad \text{II.5}$$

de donde 
$$\frac{1}{e} = \frac{A}{A_v} - 1 \quad \text{II.6}$$

y 
$$\frac{A}{A_v} = \frac{1 + e}{e} \quad \text{II.7}$$

Con lo anterior, la relación entre la velocidad de filtración y la de descarga resulta ser:

$$V_f = \frac{1 + e}{e} V \quad \text{II.8}$$

La velocidad de filtración tampoco es una velocidad real, ya que el flujo ocurre en una línea sinuosa, es por lo tanto la velocidad de descarga y la de filtración son simplemente elementos de cálculo que permiten llegar a resultados correctos dentro de las consideraciones.

## II.5 PRUEBAS DE LABORATORIO

La determinación del coeficiente de permeabilidad de un suelo es un dato cuyo resultado es de mucha importancia para el proyectista, ya que de acuerdo a esto dará su criterio en algunos problemas de Mecánica de Suelos.

En el laboratorio, se podrán utilizar muestras representativas alteradas o inalteradas, según lo que se pretenda.

Los procedimientos empleados para determinar el coeficiente de permeabilidad pueden dividirse en directos e indirectos, llamados directos porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición del dicho coeficiente; otros indirectos, proporcionados en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines. Estos métodos son:

### Procedimientos directos.

Dos tipos de pruebas permiten determinar directamente el coeficiente de permeabilidad.

- 1.- Prueba de permeabilidad de carga constante.
- 2.- Prueba de permeabilidad de carga variable.

### Procedimientos indirectos.

- 1.- Cálculo a partir de la curva granulométrica (fórmula de Hazen o derivadas).
- 2.- Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
- 3.- Cálculo a partir de la prueba horizontal de capilaridad, puede ser útil como prueba rápida de campo.

Un cuadro con las pruebas de permeabilidad que requiere cada tipo de suelo, publicado por A. Casagrande y R. E. Fadum. Se representa en la lámina II.2

**COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD**  
"K" en cm. por sec. (centésimas)

	10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>0</sup>
<b>Propiedad de Drenaje</b>	Buen Drenaje			Mal Drenaje				Prácticamente Impermeabilizado			
<b>Aplicación en Pruebas de Tarea y Datos</b>	Sección Permeación de Prueba y Datos					Sección Impermeabilización de Prueba por Tarea y Datos					
<b>Tipo de Suelo</b>	Grava Limpia		Arena Limpia Mezcla de Grava y Arena		Limpia		Arena muy Fina Limpia, Gravas e Inorgánicas, Mezcla de Arena Limpia y Arena Media Gruesa, Desechos de Arena Limpia, etc.			Suelo "Impermeabilizado" que indica permeabilidad de un orden de 10 <sup>-7</sup> cm. por sec. o menor.	
	* Suelo "Impermeabilizado" que han sido modificados por un método de impermeabilización y de ensayo otro.										
<b>Determinación Directa del Coeficiente de Permeabilidad</b>	Prueba Directa de los Suelos en el Aparato Drenado (Los Datos de velocidad, Caudales de los caudales y permeabilidad Coeficiente) (Ver artículo)				Permeación de Carga Constante Requisitos para Experimentos			Permeación de Carga Variable Requisitos para los Experimentos para una Correcta Interpretación		Requisitos para Experimentos	
<b>Determinación Indirecta del Coeficiente de Permeabilidad</b>	Cálculo de la densidad aparente (ver fórmula de A. Casagrande) Aplicación únicamente a Gravas y Arenas Limpias en arena				Cálculo de la permeabilidad de los suelos (ver fórmula de A. Casagrande) Aplicación únicamente a Gravas y Arenas Limpias en arena			Cálculo de la permeabilidad de los suelos (ver fórmula de A. Casagrande) Aplicación únicamente a Gravas y Arenas Limpias en arena		Cálculo de la permeabilidad de los suelos (ver fórmula de A. Casagrande) Aplicación únicamente a Gravas y Arenas Limpias en arena	

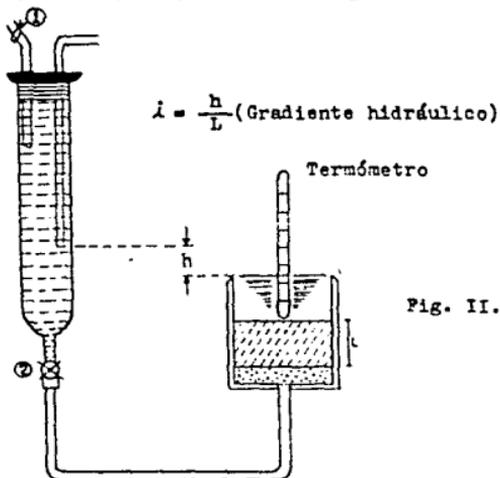
Lámina II.2

## Métodos directos

## Permeámetro de carga constante.

Este tipo de prueba se utiliza para suelos relativamente permeables, tales como gravas, arenas y mezclas de arena y grava. Los coeficientes de permeabilidad para estos suelos varían de  $10^2$  a  $10^{-3}$  cm/seg.

El procedimiento consiste en someter la muestra de suelo a un escurrimiento de agua bajo una carga constante. Como se muestra en la Fig. II.4. Con base en la ley de Darcy, a partir del gasto observando, área de la sección transversal de la muestra, longitud, carga aplicada y temperatura del agua.



## EQUIPO

- 1.- Permeámetro de lucita: 10 cm. de diámetro interior y 20 cm — de longitud, para arenas; 20 cm de diámetro interior y 1 m. de longitud para gravas, o mezclas de grava y arena.
- 2.- Dispositivo de abastecimiento.
- 3.- Termómetro.
- 4.- Cronómetro.
- 5.- Pisón metálico de 4 cm de diámetro y 300 g de peso.

6.- Malla # 100 ( 0.149 mm ).

7.- Balanza.

### 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 éste conjunto, que es considerado como la tara. Se registra su valor, así como el número de permeámetro, en el registro.
- 3.- El material seco se coloca en capas, las cuales deben apisonarse, a fin de que la muestra quede uniformemente compactada en todo su espesor. Mediante ensayos preliminares de compactación, se tratará de hallar el espesor de las capas, así como el número y la intensidad de los golpes requeridos para que el espécimen tenga la misma relación de vacíos que el suelo.
- 4.- Se pesa el permeámetro con la muestra compactada; este peso, menos el de la tara, representa el peso de la muestra seca, y se mide la longitud total de la muestra (  $L$  ) y se anotan.
- 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 en el recipiente, con objeto de que la saturación se efectuó exclusivamente por capilaridad y la expulsión del aire de la muestra sea más efectiva.
- 6.- Se cierra la llave 2 ( Fig. II.4 ) y se llena la bureta por la parte superior. Se ajusta entonces la altura de la parte inferior del tubo más largo para dar a la muestra el gradiente hidráulico,  $\lambda$ , escogido. El gradiente está dado por el cociente de la carga,  $h$ , entre la longitud de la muestra,  $L$ . El gradiente aplicado no debe ser superior al crítico, a partir del

cual las partículas se ponen en suspensión, a menos de sujetar la muestra colocando un disco poroso en la parte superior de la misma.

- 7.- Se cierra la llave 1 y se abre la 2, dejando conectada a la atmósfera la vena más larga. Se deja escurrir el agua durante 15 minutos, a fin de establecer el régimen.
- 8.- Transcurrido este tiempo, se deja salir el agua hasta llegar a una marca conocida. Se cierra entonces la llave 2.
- 9.- Simultáneamente. Se abre la llave 2 y se pone en marcha el cronómetro, el cual se detiene al pasar el nivel de agua de la bureta por otra marca conocida.
- 10.- Para calcular el coeficiente de permeabilidad se aplica la fórmula.

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

donde:

V = Volumen de agua medido.

L = Longitud de la muestra.

A = Area de la sección transversal del espécimen.

h = Carga bajo la cual se produce la filtración.

t = Tiempo en que se efectuó la prueba, en seg.

El valor del coeficiente de permeabilidad a la temperatura de 20 ° se obtiene mediante la expresión.

$$K_{20'} = \frac{V_r}{V_{20'}} Kt$$

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

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

V<sub>v</sub> = Volumen de vacíos.

$V_s$  = Volumen de sólidos.

$V_t$  = Volumen total.

$S_s$  = Densidad de sólidos

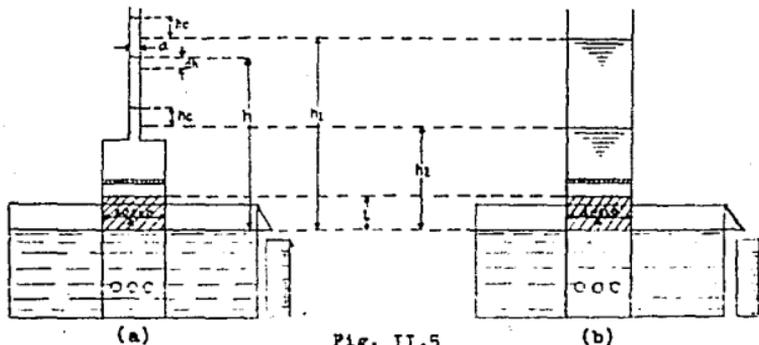
$W_s$  = Peso de los sólidos

Cuando el material es grava o mezcla de grava y arena, se usa un permeámetro de dimensiones mayores, apropiado al tamaño de la grava.

En ocasiones esta prueba se realiza aplicando una presión vertical a la muestra, tratando de reproducir las condiciones de campo. Para facilitar cálculos, se podrá utilizar el monograma de permeabilidad para el método de carga constante.

#### PERMEAMETRO DE CARGA VARIABLE

En este tipo de permeámetro se mide la cantidad de agua que atraviesa una muestra de suelo, por diferencia de niveles en un tubo alimentador. En la Fig. II.5 aparecen dos dispositivos típicos el ( a ) usado en suelos predominantemente finos y el ( b ) apropiado para materiales más gruesos.



- a) Para suelos finos.  
b) Para suelos gruesos.

Al ejecutar la prueba el tubo vertical se llena de agua, observando su descenso del agua a medida que atravieza en la muestra.

Con referencia a la Fig. II.5 sea:

$a$  = Area del tubo vertical de carga.

$A$  = Area del espécimen.

$L$  = Longitud del espécimen.

$h_1$  = Carga hidráulica al principio de la prueba.

$h_2$  = Carga hidráulica al final de la prueba.

$h_c$  = Altura de ascensión capilar.

Para este tipo de permeámetro de carga variable, Darcy llegó a la deducción de la fórmula que nos permite determinar el coeficiente de permeabilidad de un suelo de la siguiente forma:

$$K = 2.3 \frac{L a}{A t} \log. \frac{h_1}{h_2}$$

Donde  $t$ , el tiempo de prueba y las demás letras se mencionaron en la Fig. II.5

#### UN DISPOSITIVO MAS DETALLADO DEL PERMEANSTRO DE CARGA VARIABLE

Mediante una selección apropiada de las dimensiones de la probeta de suelo y de la bureta, el procedimiento de prueba resulta aplicable a suelos con coeficiente de permeabilidad comprendido entre  $10^{-1}$  y  $10^{-6}$  cm/seg. en general suelos no plasticos. Para suelos menos permeables, los tiempos de prueba resultarían tan prolongados que la evaporación y las variaciones de temperatura producirían errores importantes. Para estos tipos de suelos es conveniente

realizar la prueba con un gradiente hidráulico alto aplicado mediante presión de aire, o calcular el coeficiente de permeabilidad a partir de los resultados de una prueba de consolidación.

**EQUIPO:**

- 1.- Sistema para desaeerar agua Fig. II.6
- 2.- Permeómetro de carga variable Fig. II.7. El diámetro y longitud de la probeta y el diámetro de la bureta se seleccionarán de manera que la velocidad de descenso del menisco no sea mayor de 1 cm/seg. ni menor de 1 cm/min. suponiendo que se aplica un gradiente de 10 a través de la probeta, estos criterios establecen las siguientes menciones límites:

K, en cm/seg	Relación diámetro de la probeta a diámetro interior de la bureta.
$10^{-1}$	1
$10^{-6}$	50

- 3.- Cucharón, embudo, compactador, cápsulas, calibrador de vernier, termómetro, balanza de 0.1 g. de precisión, -- probeta graduada, arena estándar de ottawa, cronómetro, sistema de vacíos, agua destilada, horno.

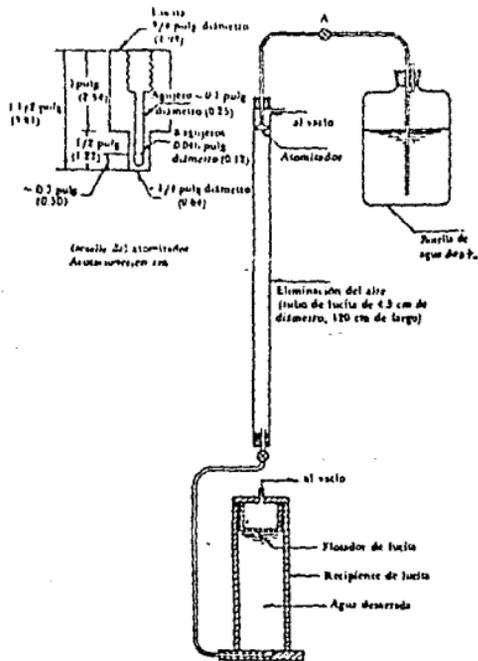


Fig. II.6

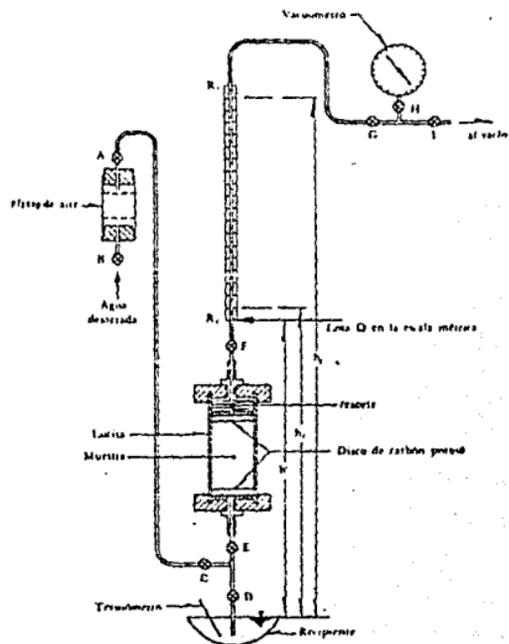


Fig. II.7

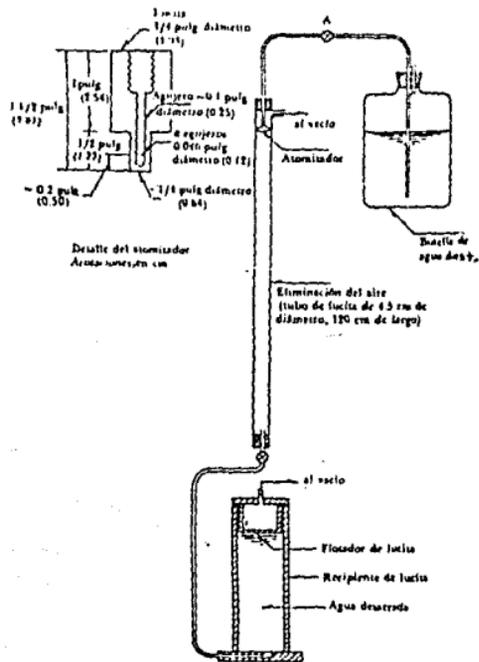


Fig. II. 6

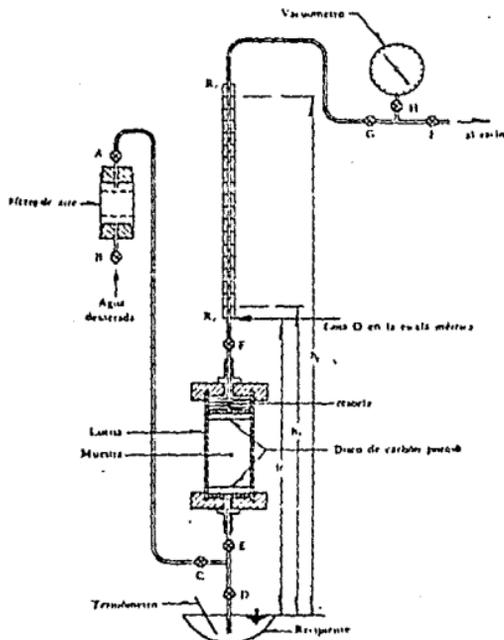


Fig. II. 7

## P R O C E D I M I E N T O

### a) Preparación de agua desaerada.

Se emplea el equipo descrito Fig. II.6, los pasos a seguir -- son los siguientes:

- 1.- Se aplica vacío a la columna de desaerado y al recipiente de almacenamiento de agua desaerada.
- 2.- Se permite que el agua destilada fluya, en una delgada capa, -- por la pared interior de la columna de desaeración, con un -- gasto aproximado de  $5 \text{ cm}^3/\text{seg}$ .
- 3.- Cuando se halla terminado el proceso de desaeración, se interrumpe el flujo de agua destilada y se remueve el vacío de la parte superior del recipiente de almacenamiento. se desconecta el tubo de la base de la columna, y se utiliza este para extraer agua.

### b) Determinación del área de la sección transversal interior de la bureta.

- 1.- Se llena la bureta con agua desaerada aplicando un ligero vacío en la parte superior.
- 2.- Se anota la lectura en la escala graduada correspondiente a la parte inferior del menisco en la bureta.
- 3.- Se extrae suficiente agua de la bureta, la cual se pasa a una probeta graduada, para abatir el nivel del menisco 20 cm, aproximadamente. Se anota la nueva lectura del menisco.
- 4.- Se determina el volumen de agua extraído por diferencia de pesos, o bien midiendo en la probeta graduada.
- 5.- Se calcula el área de la sección transversal interna de la bureta.
- 6.- Se repiten, por lo menos dos veces, los pasos 3 a 5 utilizando diferentes porciones de la bureta en cada ocasión.

### c) Preparación de filtro de aire.

- 1.- Se adapta un tapón de hule en uno de los extremos del filtro y en la sección corta de tubo de nylon deberá insertarse en el agu-

jero del tapón de hule, de forma que el filtro de aire se pueda conectar a la tubería en el arreglo definitivo.

- 2.- Un pedazo circular de malla N° 40, se coloca en contacto con el tapón, dentro del tubo.
  - 3.- Una capa de 6 mm de espesor de arena estándar de ottawa se dispone sobre la malla y se compacta con el pisón de hule.
  - 4.- Un pedazo circular de malla N° 200 se pone sobre la arena estándar de ottawa.
  - 5.- Sobre la malla N° 200; se distribuye una capa de 1 cm. de espesor aproximadamente, del suelo cuya permeabilidad se va a determinar.
  - 6.- Sobre la capa de suelo, se acomoda otra malla N° 200, una capa de arena estándar de ottawa de 6 mm de espeso, y una malla --- N° 40.
  - 7.- Se inserta un segundo tapón de hule, y un tramo de tubería de nylon en el extremo abierto del tubo de lucita.
  - 8.- Se monta el filtro de aire según se muestra en la Fig. II.7.
  - 9.- Se aplica vacío abajo de la válvula D, estando la E cerrada, - al filtro de aire y tubo de conexión. El vacío no debe aplicar se súbitamente, ya que podría causar segregación de los finos' dentro del filtro.
  - 10.- Se permite que el agua desaeerada sature, lentamente, el fil-  
tro y el tubo de conexión. Se cierra la válvula C y se desco-  
necta el aparato de vacío.
- d) Preparación del espécimen.

Las muestras inalteradas pueden ensayarse en un permeámetro' si se toma la precaución de rodearlas con un gel bentonítico; en - general, es preferible realizar la prueba directamente en el tubo' muestrador o en una cámara de presión, confinando la muestra con - una membrana de hule.

El procedimiento para preparar muestras de suelo compactados es el siguiente:

- 1.- El suelo por ensayar se seca en el horno.
- 2.- Se pesa el tubo del permeámetro con sus dos tapas de lucita, los dos discos porosos y el resorte de acero inoxidable.
- 3.- Se mide el diámetro interior del tubo del permeámetro, y se calcula el área de su sección transversal  $A$ .
- 4.- Se atornilla uno de los extremos del tubo en la base de lucita del permeámetro. Se coloca uno de los discos porosos (sin resorte) dentro del tubo.
- 5.- El suelo secado al horno se pone en el tubo del permeámetro, utilizando un procedimiento de compactación adecuado para lograr la relación de vacíos que se desee. El mejor procedimiento para preparar la probeta debe seleccionarse experimentalmente si se va a compactar el suelo por capas, cada capa sucesiva deberá compactarse con una presión mayor que la anterior. Para lograr una relación de vacíos razonablemente uniforme.

La superficie de cada capa deberá escarificarse después de compactada, para evitar la formación de una delgada capa de finos en el contacto entre capas sucesivas. La segregación de finos puede reducirse a un mínimo, utilizando presión estática para la compactación.

Es común compactar el suelo con el contenido de agua óptimo, tratando de proporcionar al material la misma energía de compactación que la especificada para la prueba estándar.

- 6.- Sobre la última capa de suelo, se instalan el disco poroso y el resorte.
- 7.- La tapa de lucita se atornilla en el extremo abierto del tubo del permeámetro. El resorte deberá estar ligeramente comprimido cuando la tapa de lucita quede atornillado firmemente.
- 8.- Se pesa el permeámetro con el suelo. Si la probeta se preparó con un contenido de agua especificado, el peso seco del suelo deberá determinarse después de la prueba.
- 9.- Se monta el permeámetro como se indica en la Fig. II.7.

- 10.- Se cierra la válvula D y se aplica vacío a la parte superior de la bureta. Se aumenta el vacío lentamente para evitar la segregación de finos.
- 11.- Se abre ligeramente la válvula D, y se deja que el agua del recipiente de descarga llene la línea hasta el nivel de la válvula E, aproximadamente; se cierra entonces la válvula D.
- 12.- Se abre lentamente la válvula C y se satura la probeta, permitiendo que el nivel del agua suba en la bureta hasta la parte superior de la escala. Se cierra la válvula y se deja de aplicar el vacío a la bureta.
- 13.- Se mide la longitud L, de la probeta con el calibrador y se calcula la relación de vacíos.
- e) Determinación de la permeabilidad.
- 1.- Se llena el recipiente de descarga hasta que se derrame.
- 2.- Se mide la distancia,  $h'$ , de la elevación del agua en el recipiente de descarga hasta la marca 0 de la escala de la bureta. La carga,  $h$ , a través de la probeta en cualquier momento es igual a  $(h' + R - \Delta h)$ , donde R es la lectura en la escala cuando el cero se encuentra en su parte inferior, y  $\Delta h$  la altura capilar en la bureta (función de su diámetro).
- 3.- Se abre rápidamente la válvula D. Cuando el nivel del agua pase por la lectura R, (por ejemplo, 70 cm) en la escala, el cronómetro se pone en marcha.
- 4.- Cuando el nivel del agua se encuentre a la altura de las lecturas  $R_2, R_3, R_4$  (por ejemplos: 50, 30, y 10 cm), se registran los tiempos  $t_2, t_3$  y  $t_4$ .
- 5.- Se suspende la prueba, antes de que el menisco alcance la base de la bureta.
- 6.- Se permite que el agua desecrada llene la bureta nuevamente, y se repite la prueba, por lo menos dos veces.
- 7.- Se mide la temperatura en el recipiente de descarga.

## PERMEAMETRO DE CARGA VARIABLE CON PRESION ADICIONAL

El permeámetro instalado en la Universidad Anáhuac, (institución donde realizó las pruebas), nos permite minimizar problemas tales como la calidad de sello entre muestra y molde como también la deficiente saturación del espécimen, nos permite compactar el suelo directamente en el molde; haciendo una relación entre el volumen — del molde y el volumen de la muestra que se requiere para cada tipo de compactación. Es posible aplicar contrapresiones hasta de 4 —  $\text{kg}/\text{cm}^2$  para aumentar el grado de saturación de la muestra.

El diámetro interior del molde es de 15.20 cm y una altura de 6.96 cm, por lo que se tiene un menor efecto de escala y una mayor precisión.

Este permeámetro cuenta con dos moldes de acero industrial para usos mecánicos, también de una bureta en la entrada y otra a la salida del espécimen con lo que es posible verificar si la muestra absorbe agua; tanque de presión con un manómetro y un depósito de agua desaerada; como se muestra en la Fig. II.8 y Fig. II.9.

### PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

#### Colocación de la muestra dentro del permeámetro

- 1.- Se compacta la muestra en el molde que va a estar en la parte inferior del permeámetro o se labra el espécimen a partir de una muestra cúbica inalterada y se coloca en el molde mencionado, considerando el volumen y la compactación del material en estudio.
- 2.- Una vez preparada la muestra, se coloca en el permeámetro un filtro en la parte inferior y, se monta el molde que contiene la muestra sellando en la parte inferior y superior de este todo su alrededor de hule.
- 3.- Encima de la muestra se coloca otro filtro, posteriormente se acomoda la placa rígida porosa de latón colocando el resorte —

calibrado en el centro de la placa rígida.

- 4.- Se coloca el segundo molde metálico encima del primero y colocando otro empaque encima de este, y se procede a tapar todo - el cilindro, las barras que sobresalen de la parte superior se atornillan con sus tuercas uniformemente, hasta donde se considera que no tenga fuga. Quedando el conjunto armado como se indica en la Fig. II.8.

En el cálculo de la prueba se necesita el área transversal de la bureta, se llena de agua la bureta B y se anota el - valor indicando en el menisco inferior, preparando una probeta graduada en la salida del agua, en el momento que se deja descender el agua inmediatamente se extrae en la probeta, hasta - llegar a una distancia conocida y, se repiten varias veces para sacar el promedio del volumen de agua que se recibe en la - probeta y determinamos el área por la sig. expresión.

$$A = \frac{V}{h}$$

#### Saturación del Sistema

- 1.- Se abre la válvula 1; que alimenta el sistema con aire a presión.
- 2.- Se abren las válvulas 2, 5 y 6, estando cerradas las válvulas 7, 8 y 9, con la válvula 2 se controla la presión que llega - al depósito de agua desaerada y cuando comience a llegar en - la muestra llegando por la 7 se abren la 8 y la 9, cerrada 10. Cuando el nivel de la bureta B suba hasta la parte superior se cierran las válvulas 6 y 9.
- 3.- Se abren las válvulas 4, 13 y 11, cerrada la 12 hasta que el - nivel de la bureta 1 esté en la parte superior; se cierran entonces la 11 y 13.
- 4.- Se abren las válvulas 14 y 16 para llenar el permeámetro, dejando escurrir lentamente el agua en su interior; cuando empiece a salir agua por la válvula 16 deben cerrarse las mismas 16

y 14, si tiene aire en el permedmetro sacar por la válvula 16' y abriendo la 14.

#### APLICACION DE LA CONTRAPRESION

- 1.- Se abren las válvulas 7,8,10,12,15 y 18 y se aplican incrementos iguales de presión conservando la diferencia inicial entre presión y contrapresión, dada en la válvula 1 de la etapa de saturación del sistema.

Se observan que los niveles de las buretas A y B bajan debido a la expansión de la muestra, como esta expansión es mayor al volumen de agua que encierran las dos buretas, no deben perderse de vista estos niveles.

- 2.- Para alcanzar la contrapresión deseada deberan de subirse los niveles de las buretas tantas veces como sea necesario.
- 3.- Después del último llenado de las buretas se abren las válvulas 10, 12 y 15 y se continuan aplicando los incrementos de presión. Al llegar a la presión de trabajo se deja saturar la muestra el tiempo que sea necesario para lograr esto, hasta llegar en la condición en la cual el volumen que entra por la bureta 1 es igual al que sale por la bureta 2. Cuando se llega a esta condición se dice que ya ha quedado establecido la continuidad en el flujo.

En esta ultima condición debe evitarse cambios de temperatura en el sistema con el fin de efectuar correctamente las lecturas.

- 4.- Estando el sistema nuevamente en las condiciones de flujo establecido, se checa la presión en el manómetro y la lectura inicial de la bureta A, así como también se establecen las distancias que se van a tomar lecturas sucesivas para poder checar los resultados realizando varias pruebas con el mismo espécimen. Se puede variar la presión de cada misma prueba.

Antes de iniciar la prueba se checa si no tiene aire. Se cierra la 8 y 14 y se sube el nivel de la bureta A, cerrando -

12 y abriendo 11 y 13 acercandose a 11 inmediatamente se cierra 13 y 11, abriendo 12 y se prepara para el primer ensayo, - teniendo el cronómetro listo y el registro, se abre la válvula 15 y 19, de esta forma el agua fluye hacia el exterior del sistema permitiendo leer las diferencias de lecturas entre los intervalos establecidos inicialmente y la lectura inicial de la bureta A.

Método de cálculo, por los dos últimos métodos.

$$K = 2.3 \frac{aL}{\Delta t A} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad \Delta t = (t_2 - t_1)$$

Donde:

a = Area de la bureta en  $\text{cm}^2$ .

L = Espesor de la muestra en cm.

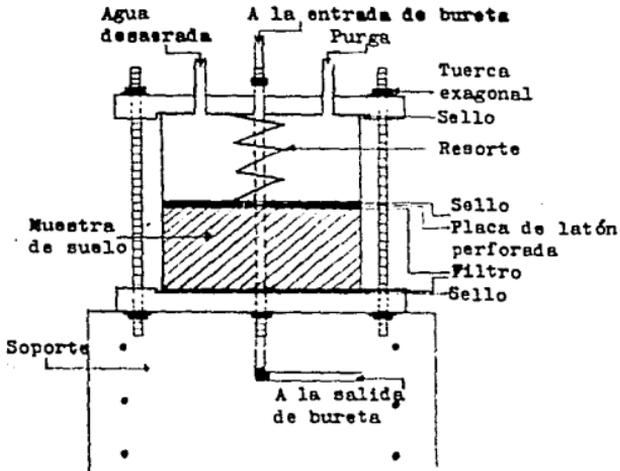
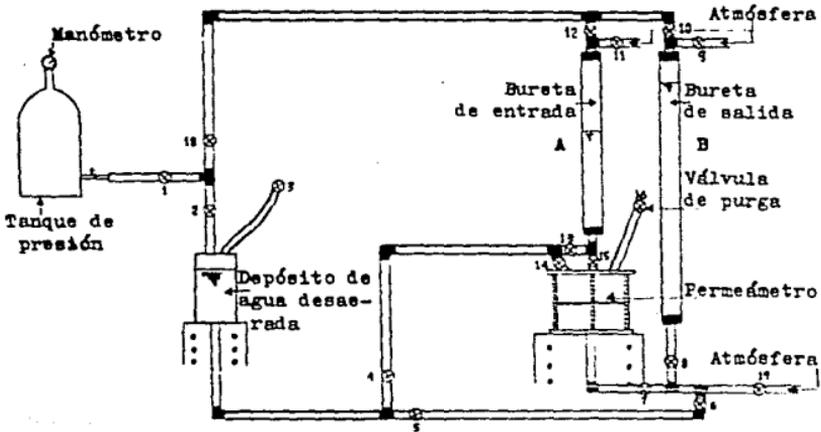
A = Area de la muestra en  $\text{cm}^2$ .

$h_1$  = Carga inicial.

$h_2$  = Carga final.

$\Delta t$  = Tiempo que tarda el agua al bajar de  $h_1$  y  $h_2$

PERMEAMETRO DE CARGA VARIABLE FIG. II.8



DETALLE DEL PERMEAMETRO FIG. II.9

Determinación del coeficiente de permeabilidad a partir de la curva granulométrica.

Es una correlación entre la granulometría de un material y su permeabilidad; en suelos arenosos gruesos, los poros entre estos materiales son relativamente grandes y por ello la permeabilidad es mayor; estas correlaciones tienen un valor muy limitado, debido a otros factores, aparte del tamaño, ejercen influencia en el valor del coeficiente de permeabilidad en estudio; para la obtención de este valor se emplea una fórmula única que no toma en cuenta los factores. Por lo tanto las expresiones que se mencionan más adelante deben verse como una manera muy tosca de valuar la permeabilidad de un suelo y no sustituir a métodos más precisos más complicados y costosos, cuando se requiera de un valor correcto de permeabilidad.

Estos métodos se basan de la fórmula clásica de Allen Hazen (1892).

$$K = C D_{10}^2 \text{ (cm/seg)}$$

En donde:

K = Es el coeficiente de permeabilidad en cm/seg.

D = Es el diámetro efectivo de Hazen en cm.

Hazen experimentó con arenas uniformes con diámetro comprendido entre 0.1 y 3 mm; C varió entre 41 y 146, tomando como promedio C = 116, sin embargo la fórmula se ve que es inaplicable a la mayoría de los suelos que quedan fuera de los experimentos realizados; para estos suelos la variación de la constante C resulta excesiva para que la fórmula sea muy confiable, también afecta con la temperatura, tomando en cuenta este factor la fórmula se modifica de la siguiente forma:

$$K = C ( 0.7 + 0.03t ) D_{10}^2 \text{ ( cm/seg )}$$

En donde:

$t$  = temperatura en  $^{\circ}\text{C}$ .

Otros investigadores proponen otras fórmulas de correlación Schlichter, por ejemplo, tomó en cuenta la compacidad además de la temperatura de la siguiente manera:

$$K = 771 \frac{D_{10}^2}{C} (0.7 + 0.03t) \text{ ( cm/seg )}$$

$C$  es una función de  $n$  que corresponde a los valores.

$n = 0.26$	$0.38$	$0.46$
$C = 83.4$	$24.1$	$12.8$

Terzaghi da, para suelos arenosos, la siguiente fórmula:

$$K = C_1 D_{10}^2 (0.7 + 0.03t) \text{ ( cm/seg )}$$

Donde:  $C_1 = C_0 \left( \frac{n-0.13}{\sqrt{1-n}} \right)^2$

En donde  $n$  es la porosidad y  $C_0$  un coeficiente con los valores indicados en la siguiente tabla.

Arenas de granos redondeados	$C_0 = 800$
Arenas de granos angulosos	$C_0 = 460$
Arenas con limos	$C_0 = 400$

Todas las fórmulas dichas suponen que el coeficiente de permeabilidad es directamente proporcional al cuadrado del diámetro efectivo; otros autores proponen exponentes diferentes ( Knapen, 1.28; Dore, 2.26; Turnbull, 1.5, etc. )

Es necesario repetir que todas las fórmulas mencionadas son de valor muy limitado, válidas como normas de criterio, pero nunca sustitutivas de métodos precisos.

**Determinación del coeficiente de permeabilidad en consolidómetros de anillo fijo**

La permeabilidad de la muestra puede determinarse para distintas relaciones de vacíos en el transcurso de la prueba, basándose a partir de la siguiente expresión para el factor T:

$$T = \frac{K(1+e)t}{a_v \gamma_w R} \quad \text{seg.}$$

Se inyecta agua destilada y desasurada por la llave libre hasta subir el nivel piezométrico; cuando el abastecimiento de agua se halla desconectado, se deja que baje el nivel del piezómetro y salga el agua por la llave libre, arrastrando a su paso el aire que esta pudiera contener, se hace subir el nivel piezométrico a una altura de 10 a 40 cm, según el tipo de material, para no causar arrastres o canalizaciones en la pastilla.

Se sigue el procedimiento de una prueba de permeabilidad de carga variable. Con los resultados obtenidos se construye una gráfica, relación de vacíos-permeabilidad. Es necesario realizar las pruebas de permeabilidad independientemente de las de consolidación debido a que el agua que circula en la muestra perturba el proceso de consolidación.

El coeficiente de permeabilidad se calcula de la siguiente forma:

$$K_m = \frac{a_v C_v \gamma_w}{(1+e)1000} \quad \text{cm/seg.}$$

donde:

$$a_v = - \frac{e_2 - e_1}{p_2 - p_1} \quad \text{cm}^2/\text{kg} \quad \text{coeficiente de compresibilidad.}$$

$e_1$  y  $p_1$  son la relación de vacíos y la presión inicial.

$e_2$  y  $p_2$  son la relación de vacíos y la presión final.

$$C_v = \frac{0.917 H_m^2}{t_{50}} \quad \text{cm/seg} \quad \text{coeficiente de consolidación.}$$

$H_m$  = longitud de la trayectoria de drenaje más corta, en cm.

$t_{50}$  = tiempo, en seg. que corresponde el 50% de consolidación primaria

$\gamma_w$  = peso volumétrico del agua, en  $\text{g/cm}^3$

$e$  = relación de vacíos.

#### Prueba de permeabilidad por capilaridad horizontal

Debido a las fuerzas capilares, el agua que penetra en un suelo seco avanza con cierta velocidad; en función de esta veloci-

dad se puede determinar indirectamente la permeabilidad del suelo. Esta prueba es adecuada especialmente para ensayar rápidamente un gran número de muestras en el campo. Se usa para materiales con coeficiente de permeabilidad entre  $10^{-1}$  a  $10^{-5}$  cm/seg.

#### EQUIPO

Permeámetro de lucita 5 cm de diámetro y 20 cm de largo con una malla fija en uno de sus extremos.

Tubo de hule de 2 m. de largo 1/4" de diámetro.

3 mallas metálicas del Núm. 100, recortadas en forma de disco de unos 5 cm. de diámetro.

Un 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.

2 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.
- 2.--En la balanza de torsión se pesa el permeámetro con una malla colocada en uno de sus extremos.
- 3.--El material de la muestra seca se coloca en capas de 1 cm. de espesor apisonando cada capa con un número variable de golpes a fin de que la muestra quede uniformemente compactada en todo su espesor.

La primera capa se apisona con 10 golpes, dejando caer el pisón de una altura de 4 cm. la segunda capa con 14 golpes, la terce-

ra con 18 y así sucesivamente, conservando en todas la misma altura de caída de 4 cm.

- 4.-Se pesa el permeámetro con la muestra compactada, y se obtiene el peso de la muestra.
- 5.-Sobre la muestra compactada se coloca un disco de malla Núm. 100 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 coloca el otro disco de malla Núm. 100. Con objeto de evitar escape de agua entre el tapón y el permeámetro, se sella con cera derretida.
- 6.-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 hule, como el permeámetro, se pone éste en posición vertical con la entrada del agua por la parte inferior.

Se hace que el agua vaya penetrando muy lentamente hasta que la arena de ottawa, se sature y al llegar el agua a la muestra se coloca el permeámetro en posición horizontal, en este momento se empieza a contar el tiempo con un cronómetro. Durante la prueba se rueda lentamente el permeámetro en un sentido y en otro para uniformizar el avance del agua.

- 7.-El avance del agua se mide a partir del extremo de entrada del agua en la muestra (cero en las escalas). Todos los tiempos se miden a partir del momento en que el agua entra en la muestra. Las lecturas se hacen cada vez que el agua avanza 1 cm. el avance del agua en la muestra se efectúa debido a dos cargas, la carga de capilaridad que actúa en el frente de avance del agua y la carga de presión provocada por la diferencia de elevación entre el nivel del agua en el depósito de abastecimiento y el nivel del agua en la muestra.
- 8.-Es necesario durante la ejecución de la prueba variar la carga de presión, para esto se inicia la prueba con el depósito de abastecimiento a una altura tal que la diferencia del nivel del

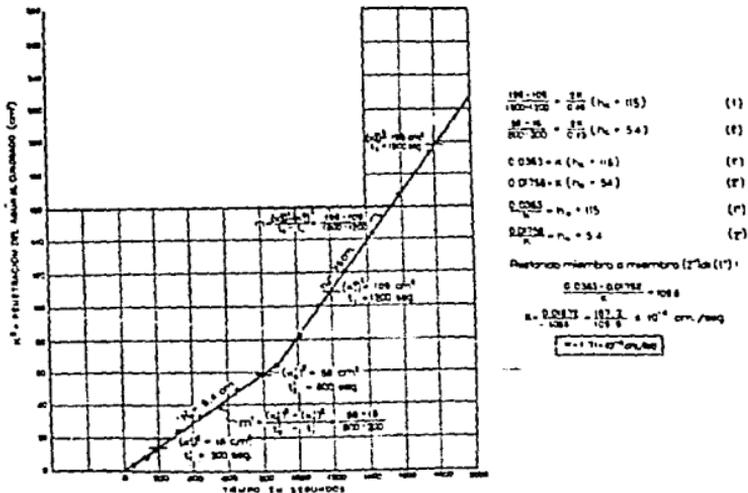
agua en éste y el centro de la muestra sea de 5 a 15 cm. una -- vez que el agua ha avanzado hasta la mitad de la longitud de la muestra, se aumenta la carga de presión subiendo el depósito de abastecimiento hasta una altura tal que la diferencia del nivel del agua sobre el centro de la muestra sea de 1 m. para suelos arenosos y aproximadamente 2 m. para suelos limosos.

Se registra la temperatura del agua del depósito de abastecimiento. Esta temperatura será la de la prueba.

9.- En un sistema de coordenadas rectangulares, se fijan los puntos cuyas ordenadas son los cuadrados de los avances del agua, medidos en centímetros y cuyas abscisas son los tiempos en segundos; uniendo estos puntos se obtienen dos rectas de distinta pendiente que corresponden a cada una de las cargas de presión  $h_0$  y  $h_1$  en las cuales se efectuó la prueba.

Con estas rectas se establecen las ecuaciones y se calcula la permeabilidad.

GRAFICA Y CALCULOS DE UNA PRUEBA DE PERMEABILIDAD POR CAPILARIDAD HORIZONTAL



## II.6 PRUEBAS DE CAMPO

Las pruebas de permeabilidad de laboratorio son útiles cuando la estructura que se estudia está formada por un material que puede considerarse homogéneo, isótropo o anisótropo, como en el caso del corazón impermeable de una cortina construido con la tierra de un banco de préstamo homogéneo. En cambio, en las formaciones naturales generalmente compuestas por mantos distintos, con variaciones importantes tanto en la disposición de los mismos como en las características de los materiales, es difícil estudiar el escurrecimiento a partir de un número limitado de ensayos sobre muestras inalteradas. En mantos de arena y grava es casi importante obtener especímenes inalterados. En estos casos es necesario recurrir a las pruebas de campo.

El tipo de prueba de permeabilidad útil en cada caso particular depende de numerosos factores, tales como tipo de material, localización del nivel freático y homogeneidad o heterogeneidad de los distintos estratos de suelo, en cuanto a permeabilidad se refiere. La selección del tipo de prueba por realizar es, por tanto, un problema delicado.

En la tabla II.2 tomando en cuenta ciertas características del problema bajo estudio, se expone la aplicabilidad de los diversos tipos de pruebas de permeabilidad a los suelos aluviales típicos de las boquillas de las presas.

Tabla II.2. APLICABILIDAD DE LOS DIVERSOS TIPOS DE PRUEBAS DE PERMEABILIDAD A LOS SUELOS ALUVIALES.

Nivel Freático	Material	Prueba de lefranc.	Bombeo con medición del cono de abatimiento.	Bombeo con colocación de piezómetros.	Absorción y filtración.	Tramados pasivos.	Microperforaciones.
Por encima del nivel freático	Homogéneo.				X		
Por debajo del nivel freático	Heterogéneo.				X		
Por encima del nivel freático	Homogéneo.	X	X				
Por debajo del nivel freático	Heterogéneo.	X		X		X	X

Los resultados obtenidos de los diversos métodos de interpretación, propios de cada prueba, son semejantes.

#### PRUEBA LUGESON

Esta prueba consiste en inyectar agua a presión en tramos de perforación, nos da una idea aproximada de la permeabilidad en grande, la debida a las fisuras de la roca o del material granular cementado estudiado. se hace variar la longitud de los tramos probados, como también la presión a la que se inyecta el agua.

A lo que se le conoce como unidad Lugeon es igual a la absorción de un litro de agua por minuto, por metro de sondeo, con una presión de 10 kg/cm<sup>2</sup>.

La prueba se trata de obtener para diferentes tramos, curvas de gastos de absorción en función de la presión de inyección. Se recomienda usar tramos de prueba de longitud reducida ( 1 m. o a un menos ), y así analizar detalladamente zonas de características excepcionales.

## EQUIPO

Un obturador o empaque con su correspondiente tubo de inyección. Existen numerosos tipos de obturadores. Los mecánicos son adecuados para perforaciones de diámetro mayor de 90 mm; el sello se logra comprimiendo una serie de rondanas de hule que presiona sobre las paredes de la perforación. Los de copa de cuero, la presión de inyección acuña una serie de copas contra las paredes de la perforación; este tipo de obturador requiere que las perforaciones sean muy regulares y perfectamente cilíndricas. Los obturadores neumáticos constan de cubiertas cilíndricas de hule que se expanden por inyección de aire comprimido; estos obturadores son eficientes pero de colocación delicada. En todos los casos, la longitud del obturador debe ser de 30 cm por lo menos y de preferencia de más de 1 m.

Una bomba. La bomba necesaria para inyectar agua a presión debe ser tal que no produzca variaciones rápidas de la presión, por tanto, debe usarse una de varios pistones, o de gusano, pero de preferencia una centrífuga de alta presión.

Medidor de gastos de agua. Sólo los medidores del tipo venturi permiten determinar el gasto con la precisión suficiente (del orden del uno por ciento).

Uno o varios manómetros. El manómetro debe ser de buena calidad y encontrarse en buen estado. Se calibrará cuidadosamente por comparación con un manómetro de precisión. El manómetro no debe colocarse directamente en la manguera o tubería de desfogue de la bomba, que podría dañar por la bomba.

Agua. El agua de inyección debe ser limpia y sin materiales en suspensión para evitar taponamientos en el medidor de gastos de agua, así como en las fisuras del terreno por probar, los cuales pueden inducir errores apreciables en la prueba.

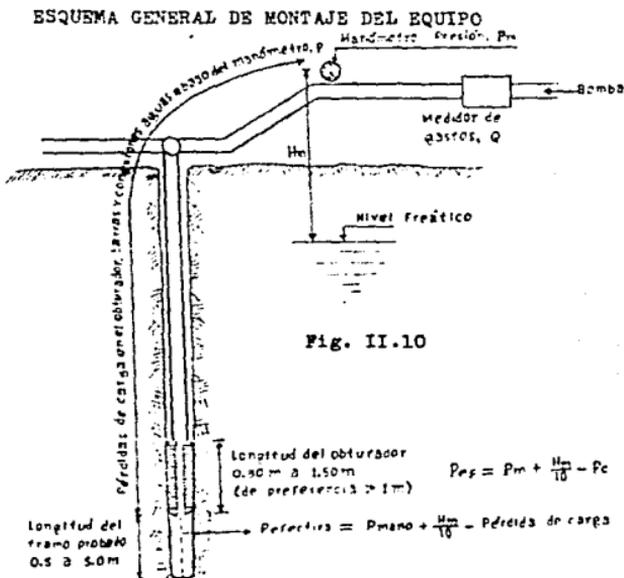
## P R O C E D I M I E N T O

Verificación del sello.

La colocación de los empaques en la perforación, con objeto de sellar el tramo por probar, puede resultar muy delicada. Para apreciar la calidad del sello, se inyecta agua y se observa si sube por la perforación. Si el agua sube, esto puede deberse a dos causas:

- 1.- La perforación no es regular y el empaque no ajusta.
- 2.- El terreno está muy fisurado y se establece un cortocircuito alrededor del empaque.

En el primer caso es necesario desplazar el empaque algunos centímetros, o metros, hasta poderlo ajustar perfectamente o aumentar la longitud del empaque para lograr un mejor sello. En el segundo, resulta difícil la realización de la prueba, por lo que se pensará otro tipo de prueba como de (LeFranc en material saturado, Matsuo o Nasberg en caso contrario)



$1 \text{ litro/m} = 1 \text{ litro por metro y por metro bajo 10 atm de presión ejercida}$   
 $1 \text{ litro/cm} = 10^{-4} \text{ m}^3/\text{seg.}$

### Realización de la prueba

- 1.- Verificado el sello, se anotan los datos correspondientes al tramo probado: profundidad del nivel freático, profundidad y longitud del tramo probado, diámetro y longitud de la tubería de inyección.
- 2.- Se aplica el primer incremento de presión de inyección, se observa el gasto correspondiente, y se espera de 5 a 10 min. a' que este se estabilice, y se registran los valores del gasto' y de la presión correspondiente.
- 3.- Se repite el paso anterior hasta llegar a una presión máxima de  $10 \text{ kg/cm}^2$ , y se procede a aplicar decrementos de presión, y registrando los valores de presión y gasto correspondiente. Es conveniente trazar el diagrama gasto-presión conforme progresa la prueba para ir observando las particularidades de la curva obtenida. La presión considerada debe ser la presión -- efectiva, P, en la zona de prueba, y obtenerse a partir de la presión leída en la superficie, Pm, tomando en cuenta las pérdidas de carga en la tubería y en el obturador, Pc, así como' la profundidad del nivel freático con respecto al plano de -- lectura del manómetro, Hm.

$$P = P_m + \frac{H_m}{10} - P_c$$

- 4.- Se calcula el valor de la absorción en unidades Lugeon, dividiendo el gasto correspondiente a una presión de  $10 \text{ kg/cm}^2$ , - expresado en lt/min, entre la longitud de la zona probada, expresada en metros.

### Interpretación de la prueba

El valor de la absorción no es la única información, la forma de las curvas gasto-presión es muy variable que depende de las características de fisuración de la masa: distribución y espesor.

de las fisuras, tipo de relleno etc. Al aumentar la presión la variación del gasto no es lineal, salvo en contados casos.

Cuando se tapan o se destapan las grietas con materiales de relleno provocan, a diversas presiones, aumentando o disminuyendo la permeabilidad. Por lo cual se debe tomar en cuenta al valorar la permeabilidad.

#### PRUEBAS LEFRANC-MANDEL

Esta prueba consiste en medir el coeficiente de permeabilidad en algun punto de un terreno aluvial o de una roca fisurada cuando el material es saturado por el manto freático.

Consiste en inyectar agua en una cavidad del terreno de forma geométrica definida, situada debajo del nivel freático, con una pequeña carga de agua constante. El coeficiente de permeabilidad se calcula con la medida del gasto y de la carga del agua, en la vecindad de la cavidad con una buena aproximación.

Si  $Q$  es el gasto de inyección y  $\Delta H$  la carga aplicada, se tiene:

$$Q = C K \Delta H$$

Donde:

$C$  es un coeficiente que tiene dimensión de longitud y que caracteriza geomóricamente la prueba.

Y tiene los siguientes valores para cavidades de forma geométrica sencilla.

Cavidad en forma de disco de radio $r$	$C = 4r$
Cavidad semiesférica de radio $r$	$C = 2\pi r$
Cavidad esférica de radio $r$	$C = 4\pi r$
Tubo perforador de longitud $L$ y radio $r$	$C = \frac{4\pi}{\frac{2}{L} \log \frac{L}{r} - \frac{1}{2H}}$

## EQUIPO

## Bomba

Sistema de medición del gasto, incluyendo un recipiente elevado con rebosadero, una válvula de aguja, un cono al que se adapta una válvula de tres pasos, un recipiente de volumen conocido y un cronómetro como se muestra en la Fig. II.11.

Tubería de longitud suficiente para alcanzar la cavidad de inyección.

Sonda eléctrica para medir el nivel de agua en la perforación, con amperímetro de buena sensibilidad.

## P R O C E D I M I E N T O

- 1.- Se realiza una perforación hasta la profundidad deseada, estabilizando las paredes mediante un ademe, el cual se rellena con grava limpia de muy alta permeabilidad (grava uniforme de 3 cm. por ejemplo) sobre una longitud igual a la deseada para la prueba, por lo general un metro. A continuación se levanta el ademe un metro, quedando la perforación lista para realizar la prueba y se registra el diámetro del ademe.
- 2.- Se mide la profundidad del nivel freático,  $H_0$ , respecto a la parte superior del ademe, repitiendo esta medición a distintos tiempos para asegurarse de que este nivel se ha estabilizado.
- 3.- Se pone en marcha la bomba que alimenta el recipiente elevado con rebosadero.
- 4.- Al derramar el agua del recipiente, se abre la válvula 1 con la válvula 2 conectada a la perforación. El agua que se derrama debe canalizarse hasta cierta distancia del punto de medición, o formar un circuito cerrado con el agua bombeada para no perturbar la prueba.
- 5.- Se mide la variación con el tiempo del nivel de agua,  $h$ , en la perforación, respecto a la parte superior del ademe.
- 6.- Cuando dicho nivel queda estabilizado durante 10 min, se anota el valor correspondiente,  $H_1$ .
- 7.- Se conecta la válvula 2 con el recipiente de volumen conocido,

y se mide y anota el tiempo T, necesario para llenarlo.

8.- Se repite la prueba en el mismo punto, variando los gastos -  
inyectados y midiendo los-respectivos niveles estabilizados'  
de agua en la perforación.

9.- Se calcula el coeficiente de permeabilidad del material me-  
diante las fórmulas correspondientes al caso de un tubo per-  
forado de longitud L (generalmente 1 m) y radio r:

$$Q = CK (H_1 - H_0)$$

por lo tanto

$$K = \frac{Q}{C (H_1 - H_0)}$$

Donde

$$C = \frac{4\pi}{L \log \frac{2L}{D} - \frac{1}{2H}}$$

Siendo H la profundidad media del tramo probado con respecto al -  
nivel freático.

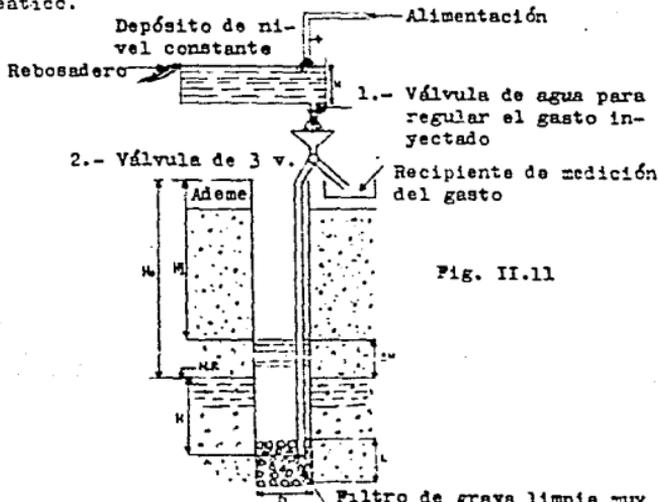


Fig. II.11

### PRUEBAS DE BOMBEO

Para determinar la permeabilidad de un manto de material permeable, donde es difícil obtener muestras inalteradas, se recurre a una prueba de bombeo, la cual se lleva a cabo perforando un pozo central de bombeo con ademe ranurado y en forma concéntrica, una serie de pozos de observación, se colocan ademes ranuradores y se observa directamente la superficie libre del cono de abatimiento creado por el bombeo (manto homogéneo) o piezómetros, y se llega a conocer las presiones de agua en toda la zona afectada (manto heterogéneo).

La interpretación de esta prueba y, el cálculo del coeficiente de permeabilidad del medio supuesto homogéneo se determina por medio de las fórmulas de Dupuit-Thiem o de Theis-Lubin. Ambos métodos consideran que el pozo de bombeo abarca todo el manto permeable, sin embargo, la prueba se puede llevar a cabo con un pozo, que cubra parcialmente el manto, ya que el error no es muy apreciable.

#### EQUIPO

- 1.- Un ademe ranurado.
- 2.- Una bomba de pozo profundo.
- 3.- Un tanque amortiguador en la descarga de la bomba, que constará de una pantalla de malla de acero, rellena de grava para la disipación de energía del agua, un medidor de gasto (del tipo venturímetro triangular delgado y escala de gancho o venturímetro).
- 4.- Canal para desalojar el agua bombeada.
- 5.- Tuberías ranuradas para los pozos de observación; las ranuras son generalmente de 3 mm. de ancho y 10 cm. de longitud; distribuidas de 20 ranuras por metro.
- 6.- Sonda de tipo eléctrico para medir los niveles de los pozos.
- 7.- Reloj y otras herramientas necesarias.

## PROCEDIMIENTO

Una vez preparada la prueba, se registran los niveles iniciales de agua en los pozos de absorción y, se empieza a bombear con un valor de gasto prefijado. Se toman lecturas continuas de los niveles en los primeros momentos de bombeo, con el fin de disponer de datos suficiente durante la etapa de flujo transitorio. Posteriormente, el intervalo de tiempo entre mediciones se puede aumentar, si los datos se van a aplicar en la teoría de Dupuit, es necesario esperar manteniendo el gasto de bombeo constante, a que sea permanente el flujo de agua y, los niveles de la superficie de escurrimiento se mantengan constantes. Cuando se logra este estado, se suspende el bombeo, y se observará la recuperación de los niveles de la superficie de escurrimiento.

Cuando se halla recuperado totalmente el nivel de agua alrededor del pozo de bombeo, se vuelve a bombear el agua, pero con un valor diferente del gasto inicial, y se sigue con el mismo procedimiento.

### Interpretación de las pruebas

Los datos de las pruebas se interpretan según el método de Theis-Lubin para el flujo transitorio y de Dupuit para el flujo establecido. Las conclusiones por los dos métodos son similares, en el flujo establecido tiene la desventaja de requerir tiempos de bombeo muy largos para lograr la estabilización de niveles, suponiendo lograr efectivamente ésta prueba.

### Método de Theis-Lubin

Este método se basa en las siguientes hipótesis:

El manto permeable es homogéneo, isotrópico, de permeabilidad uniforme y extensión infinita.

El pozo central de bombeo atraviesa todo el espesor del manto acuifero y su radio es muy pequeño. El agua fluye inmediatamente fuera de la zona abatida.

La fórmula de Theis-Lubin proporciona el valor de la transmisibilidad,  $T$ , de un manto, conociendo el valor del gasto constante de bombeo,  $q$ , y del abatimiento,  $\Delta$ , del nivel freático, en un pozo, a una distancia  $R$  del pozo central, después de cierto tiempo de bombeo,  $t$ . La transmisibilidad,  $T$ , es el producto del coeficiente de permeabilidad horizontal del terreno,  $K$ , por el espesor,  $H$ , del manto permeable,  $T = KH$ .

La fórmula de Theis-Lubin es la siguiente

$$\Delta = \frac{q}{4\pi T} \int_{\frac{u}{4R^2S}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

donde  $s$  es el almacenaje específico del material.

Cuando el tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo es grande (varias horas), la ecuación de Theis-Lubin se simplifica y se puede aplicar (con tal de que  $T/R^2S$  no sea demasiado pequeño) la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{2.203q}{4\pi T} \log_{10} \frac{2.25Tt}{R^2S}$$

la cual puede reducirse a

$$\frac{\Delta}{q} = \frac{2.303}{4\pi T} \left( \log_{10} \frac{2.25T}{S} + \log_{10} \frac{t}{R^2} \right)$$

Llevando, en un diagrama semilogarítmico, en el eje de las ordenadas el valor  $\Delta/q$ , en de las abscisas, la cantidad  $t/R^2$ , el bombeo con gasto constante,  $q$  queda representado, independientemente del pozo testigo considerando y del tiempo,  $t$ , de bombeo por una recta que muestra la evolución sintética de todo el manto de agua, y permite determinar  $T$  y  $S$  del terreno.

Un método de cálculo muy útil para corroborar los valores anteriores, obtenidos por medio del bombeo, es el basado en el análisis de la recuperación de un pozo. Si se bombea en un pozo durante un tiempo conocido,  $t$ , y luego se le permite recuperarse, el abatimiento residual será el mismo que si el bombeo se hubiera mantenido, a la vez que se inyectase en el pozo el mismo gasto. Se determina  $K$  por la sig. fórmula.

$$K = \frac{2.3q}{4\pi\Delta H} \log_{10} \frac{t}{t'}$$

donde:

- $H$  = espesor del manto permeable, en m.
- $K$  = coeficiente de permeabilidad, en m/seg.
- $q$  = gasto constante de bombeo, en  $m^3$ /seg.
- $t$  = tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo.
- $t'$  = tiempo transcurrido desde la superposición del bombeo.
- $\Delta$  = abatimiento residual en uno de los pozos de observación

#### Método de Dupuit-Thien

Este método se basa en las siguientes hipótesis:

El material es homogéneo y el nivel freático estático.

Lejos del pozo, el gradiente hidráulico es constante con la profundidad a lo largo de la superficie exterior de un cilindro, cuyo eje de revolución coincide con el del pozo, el cual abarca la totalidad del manto permeable.

Suponiendo que se verifican tales hipótesis, el gradiente, a lo largo de un cilindro de revolución de radio  $r$ , es igual al valor de la pendiente de la superficie libre del escurrimiento en el punto de intersección de dicha superficie con el cilindro de radio  $r$ . Si las observaciones se realizan mediante piezómetros, es posible verificar la validez de la última hipótesis mencionada, trazando la red de flujo.

El cálculo del coeficiente de permeabilidad se realiza tomando como base una curva media de abatimiento para cada uno de los gastos de bombeo. La curva de abatimiento se construye con el promedio de los valores de abatimientos registrados en los pozos situados a una misma distancia del bombeo, y en el momento de la suspensión del bombeo (en este momento se supone que el flujo es permanente). Con estos datos, y aplicando la fórmula.

$$K = \frac{2.3q}{(h_1 - h_2)} \log_{10} \frac{R_2}{R_1}$$

Donde:

- q gasto de bombeo, en m<sup>3</sup>/seg.
- h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub> alturas, en m. del nivel libre del agua con respecto al extremo profundo del pozo de bombeo, para las líneas de los pozos 1 y 2, respectivamente.
- R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> distancias de las líneas de los pozos 1 y 2 al de bombeo.

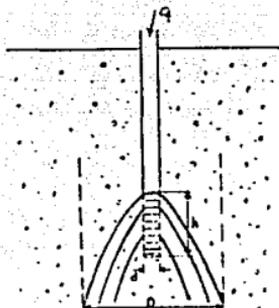
#### POZOS DE ABSORCION

Esta prueba se realiza en materiales no saturados. Con base en el estudio de Nasbery sobre escurrimiento en suelo seco, a partir de una fuente situada en la masa, Terlertskata ha obtenido una fórmula semiempírica que relaciona el gasto de absorción, q, en un pozo, bajo tirante de agua constante, h, con el coeficiente de permeabilidad del terreno.

$$K = \frac{0.423}{h^2} q \log_{10} \frac{4h}{d}$$

donde d es el diámetro de la perforación bajo la condición.

$$25 < \frac{h}{d} < 100$$



$$K = \frac{0.423}{h^2} q \log_{10} \frac{4h}{d}$$

$$\text{con } 25 < \frac{h}{d} < 100$$

$$D = 2 \sqrt{\frac{q}{\pi K}}$$

### POZOS DE FILTRACION

Esta prueba se realiza, al igual que la anterior, en materiales no saturados.

Se excavan dos pozos de planta rectangular, dispuestos paralelamente de modo que entre ellos quede un prisma del material, cuyo coeficiente de permeabilidad se desea conocer. La distancia entre las caras correspondientes de los pozos puede elegirse de acuerdo con el suelo, puede tomarse, por ejemplo, igual al m.

Se trata de determinar el coeficiente de permeabilidad con la ayuda de la red de flujo y de la medida, en un tiempo,  $t$ , de las cantidades de agua que es necesario agregar a los pozos para mantener una diferencia constante de nivel entre ellos, previa saturación de los materiales. El coeficiente se calcula con la fórmula aproximada:

$$K = \frac{NvF}{NcHm^2t}$$

donde:

$H_m$  = desnivel medio entre los tirantes de los pozos.

$K$  = coeficiente de permeabilidad, en m/hr (para obtener  $K$ , en cm/seg. se debe multiplicar por 0.0278)

$l$  = distancia entre pozos.

$Nc$  = número de canales de flujo, que resultan del trazo de

la red de flujo.

$N_v$  = número de partes en que se divide arbitrariamente la —  
caída de potencial en la red de flujo que se forma en-  
tre los dos pozos.

$t$  = tiempo en que se midió el volumen de agua añadido a ca-  
da pozo.

El valor de  $F$  se obtiene de la siguiente expresión:

$$F = \frac{C_1 A_2 H_{2m} - C_2 A_1 H_{1m}}{A_2 H_{2m} + A_1 H_{1m}}$$

donde:

$A_1$  = área media mojada del pozo 1

$A_2$  = área media mojada del pozo 2

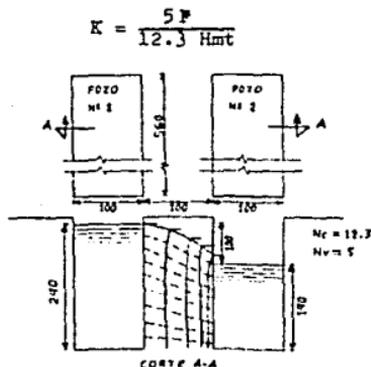
$C_1$  = Volumen de agua añadido al pozo 1

$C_2$  = Volumen de agua añadido al pozo 2

$H_{1m}$  = tirante medio del pozo 1

$H_{2m}$  = tirante medio del pozo 2

Para las dimensiones mostradas, en la sig. figura el valor de  $K$  —  
se obtiene mediante la expresión.



## P R O C E D I M I E N T O

- 1.- Se hacen dos pozos con las medidas que se indican en la fig. anterior, procurando que las bocas de los pozos queden al mismo nivel.
- 2.- Se coloca la mayor de sus dimensiones en sentido normal al — del flujo que se desea obtener, y de preferencia en el centro de la región por ensayar.
- 3.- Se llena el pozo No. 1 a 20 cm. del borde, y el No. 2 a 1.20' m, de modo que exista un desnivel de agua de 1 m. entre ambos.
- 4.- Se conservan los pozos a los niveles especificados en 3, añadiendo o quitando agua para mantener las condiciones iniciales durante 48 hrs.
- 5.- Se continúa así durante 4 hrs. más, se anotan el volumen de — agua añadido a cada pozo, los niveles iniciales y finales, y el tiempo transcurrido.
- 6.- Con los datos obtenidos, se calcula la permeabilidad.
- 7.- Se repiten los pasos 3 a 6, hasta lograr una concordancia satisfactoria entre los resultados.

## PRUEBAS MATSUO-AKAI

Matsuo y Akai han propuesto un método para medir la permeabilidad de un suelo seco.

En una zanja de longitud infinita y de ancho B, en la cual se manteniera un tirante de agua, H, se obtendrían las siguientes fórmulas para el escurrimiento plano provocado, con gasto q por unidad de longitud:

$$B = \frac{q}{H} - 2H \text{ Cuando el estrato impermeable fuera muy profundo, y}$$

$B = \frac{q}{K} + 2H$ . Cuando quedara cerca del fondo de la zanja

Se procede la excavación de una zanja rectangular y se mide el gasto de agua necesario para que el nivel se mantenga constante. Posteriormente, se prolonga la zanja, y se vuelve a medir el gasto. La diferencia entre ambos es el gasto de absorción del terreno para la longitud complementaria de zanja. Las fórmulas mencionadas permiten determinar el valor del coeficiente de permeabilidad  $K$ .

#### TRAZADORES RADIOACTIVOS Y MICROMOLINETES

Con la finalidad de llegar a conocer en los materiales finamente interestratificados la presencia de capas permeables, se puede pensar en las pruebas de inyección y bombeo de agua marcada por trazadores radioactivos. Se inyecta agua marcada y a continuación se bombea y, con la ayuda de un contador Geiger, se mide el número de golpes registrados durante el bombeo a profundidades distintas. Cuando el número de golpes es elevado, quiere decir, que el nivel de la capa es muy permeable, mientras que es reducido cuando es poco permeable. Se puede, en esta forma diferenciar cualitativamente la permeabilidad de los diferentes estratos existentes.

En forma similar se podrán medir las velocidades de flujo de los diferentes estratos mediante un micromolinete y dibujar un perfil que, en forma cualitativa, permita conocer la permeabilidad de los distintos estratos.

## C A P I T U L O III

## ARCILLAS EXPANSIVAS Y PRUEBAS DE LABORATORIO

**ARCILLAS EXPANSIVAS.**— Son aquellas que son susceptibles de sufrir un apreciable aumento de volumen, cuando hacen contacto con el agua.

## III.1 INTRODUCCION

El ingeniero no sólo se enfrenta con los problemas referentes a asentamientos si no también en casos de movimiento ascensional (levantamiento) de estructuras. Los problemas de levantamiento se producen cuando el terreno se expande, al disminuir la presión de las tierras que la confinan superiormente y/o cuando aumenta la humedad del suelo. Algunos suelos, denominados expansivos, poseen propiedades de hinchamiento en grado muy elevado -

Los problemas de levantamiento son bastantes generales y de importancia económica en aquellos países que tienen regiones áridas. En tales zonas, los suelos se secan y contraen con el clima árido hinchándose al existir humedad. El agua necesaria puede proceder de la lluvia o drenaje o por efecto de capilaridad, cuando una capa impermeable se coloca sobre la superficie del terreno, evitando así la evaporación evidentemente, cuando más ligera sea una estructura más la levantará el terreno expansivo. Así pues, los problemas de hinchamiento suelen estar asociados con estructuras ligeras, como pequeños edificios (especialmente viviendas, vertederos de presas, y pavimentos de carreteras).

### III.2 HINCHAMIENTO DE LAS ARCILLAS

Existen tres causas básicas del hinchamiento de los suelos. - Una es el resultado de una combinación del rebote elástico y, a veces, de la recuperación del contenido de humedad del suelo sujetas a compresión después de la desaparición de esta fuerza. Esto se debe cuando se secan las arcillas están sujetas a compresión disminuyendo su volumen entre sí y aumenta la cohesión, con lo que pueden cerrarse las fisuras. Si la arcilla dura se sumerge en agua, no hay tensión superficial en la superficie de la arcilla y, por consiguiente, tampoco se ejerce compresión capilar. La consecuencia es una expansión (hinchamiento) de la arcilla.

Otra explicación de este hinchamiento es la restitución de la compacidad de absorción de la arcilla que había sido rebasada por las fuerzas de evaporación durante el proceso de desecación. Cuando se esfuman las fuerzas de evaporación de los poros de la arcilla se llenan de nuevo con el agua de absorción. Un fenómeno análogo ocurre cuando se sujeta a carga un depósito de arcilla anegado. Entonces se consolida, es decir, el agua se desaloja de los poros decreciendo el volumen. Cuando se retira la carga queda restituida la compacidad de absorción de la arcilla y sobreviene la expansión.

Las otras dos causas dependen de la propiedad que poseen algunas arcillas de atraer el agua con intensidad, y de retenerla después del aumento de volumen. Estas arcillas son: 1) arcillas sensibles a la congelación y 2) arcillas sensibles al agua. En el primer caso se hinchan a temperaturas bajas es debido a que la humedad del suelo se convierte en hielo si la temperatura desciende hasta 0 por debajo del punto de congelación (0 C= 32 F). La tierra húmeda cuando está helada se puede comparar con el concreto; sin embargo, pierde su dureza tan pronto como deshíela. El suelo cuando se hiela se endurece, porque la humedad se convierte en un sólido.

La acción del hielo en las zonas templadas, como en carrete--

ras y caminos, consiste en lo siguiente: 1) en invierno y comienzos de la primavera el terreno se asienta y reblandece (algunas veces - se dice que hierve). El motivo de los levantamientos por el hielo - antiguamente solo se atribuía al hecho de helarse la humedad del poro y al correspondiente aumento volumen de éste (al rededor del 9%). Los levantamientos del 20 ó 30% del espesor de la capa helada no - son comunes.

La masa de tierra congelada se expande y ejerce una presión - de expansión grande si está confinada; este fenómeno se debe al cre - cimiento de cristales de hielo. Para la formación de cristales y - lentes de hielo se necesita agua, la cual no sólo es aportada por - la propia humedad del poro, sino que se eleva (bombea) de los estru - tos subyacones. El aumento de los cristales de hielo se explica en la figura III.1

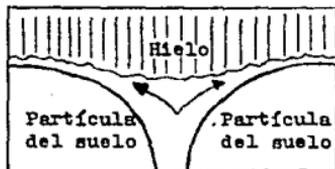


Fig. III.1

Humedad absorbida

Antes de la congelación las partículas del suelo desarro- llan partículas de humedad en su superficie, debido a la atrac-

ción capilar de la superficie libre del agua (esta última no — está indicada a la fig.) cuando el cristal de hielo empieza a — crecer, la succión desarrollada en este sentido es más fuerte — que la atracción capilar de la humedad por la superficie de la — partícula del suelo cede así su humedad al cristal de hielo que — se está formando. La pérdida de humedad de la partícula la com— pensa por capilaridad quitando agua, a su vez, a las partículas — del suelo subyacente.

La excavación de suelos helados muestra a menudo la presen— cia de lentes o capas de hielo.

El fenómeno de levantamiento o hinchazón se puede explicar: 1) al congelarse el agua disponible de los poros aumenta el volu— men del suelo; 2) por extracción de agua adicional de los estrat— tos inferiores y su consiguiente congelación para formar lentes — de hielo dentro de la masa. Esta agua adicional puede alcanzar — la capa de congelación con velocidad suficiente si se cumplen — las siguientes condiciones: 1) Hay en la proximidad una fuente — de la cual se pueda extraer agua, por ejemplo, el nivel freático — (es decir, el nivel hidráulico subterráneo); 2) el suelo es ca— paz de extraer el agua de esa superficie o nivel freático; es de— cir, contiene cierto porcentaje de partículas finas, ya que los — suelos de partículas gruesas no pueden atraer la humedad sino — desde muy cortas distancias, y 3) está expedito el camino entre — la superficie libre del agua y la superficie de congelación; es — decir el suelo tiene buena permeabilidad.

Las condiciones 2 y 3 se cumplen en limos y arcillas y es— pecialmente la 3 mejor en los limos. Por tanto podemos decir que los limos son más susceptibles de hinchazón por hielo que las ar— cillas.

Las arcillas que son sensibles al agua, que origina en — ellas expansión. La capacidad de expansión (o expansividad) de — la arcilla depende en forma primordial de su proporción en mont—

morillonita y de la de algunos tipos de illita presentes en ella.

La causa básica de la dilatación reside en la atracción y — absorción del agua (inhibición osmótica) por las redes cristalinas susceptibles de expansión de las arcillas. Otro factor que contribuye a ello reside en el alivio de la presión capilar como consecuencia del engrosamiento de las películas capilares. Cuando sobreviene el humedecimiento del suelo se dilatan automáticamente las películas capilares. De esta forma se alivia el esfuerzo de compresión, lo cual permite una nueva y mayor abertura de las redes dilatables. El hinchamiento de las arcillas está ligado a la absorción de humedad, tanto de la que procede de un líquido que venga a estar en contacto con la arcilla, como de la que viene del ambiente húmedo del aire. El agua puede entrar en contacto con la parte superior del depósito de arcilla (lluvia y nieve en fusión) o puede ser elevada desde estratos más bajos por fuerza de succión.

Según la velocidad de afluencia del agua, el hinchamiento — procede de manera gradual y dura mucho tiempo hasta alcanzar su límite. Las pruebas de laboratorio demuestran que la admisión de agua es máxima al comienzo del proceso de dilatación y sigue luego a ritmo decreciente, conforme se acumula el agua atraída, se va — constituyendo la presión de expansión. En realidad es un caso particular de la presión de poros, en la que el agua entra en un espacio insuficiente forzosamente.

### III.3. IDENTIFICACION DE LOS MINERALES CONSTITUYENTES

Existen varios procedimientos al alcance del investigador - a fin de identificar los minerales constituyentes de una arcilla; los métodos de investigación son:

- Difracción por Rayos X
- Balance térmico de las arcillas
- Microscopio electrónico
- Análisis químico

Los métodos de investigación por Rayos X y el conocido como Balance térmico de las arcillas son los más conocidos; el microscopio electrónico proporciona datos útiles también, sobre todo en lo referente a forma y tamaño de las partículas minerales. Los Rayos X se difractan a su paso a través de una muestra de arcilla - y cada trayectoria de difracción es una imagen de distintos planos atómicos; el conjunto de trayectorias retrata la estructura interna de la arcilla. Así se revela un promedio de  $2 \times 10^7$  láminas reticulares por centímetro de material.

El efecto de las altas temperaturas sobre una arcilla es extraer el agua de sus retículas laminares, transformando un mineral de arcilla en otro compuesto químico. La caolinita por ejemplo, permite la remoción de su agua estructural a partir de  $500^{\circ}\text{C}$  y el mineral puede transformarse en óxido de aluminio amorfo y sílice. Los demás minerales de arcilla presentan también efectos típicos al ser altamente calentados; estos efectos permiten su identificación.

El análisis químico también se ha usado ampliamente como medio para cubrir las mismas finalidades mencionadas.

El microscopio electrónico permite distinguir ciertos minerales de forma muy típica, tales como la haloisita (del grupo de las caolinitas y de forma tubular muy notable), pero sus resultados plantean problemas de interpretación en las formas de escamas, de las que participan gran número de minerales de arcilla (montmo

illititas e illitas).

La difracción por Rayos X puede ser más informativa en general, pero a causa del pequeño tamaño de los cristales y su orientación desordenada, las trayectorias de difracción se definen y distinguen muy difícilmente.

La investigación por altas temperaturas (balance térmico), es dudosa, sobre todo en arcillas formadas por mezclas mineralógicas; sus resultados se hacen entonces de muy penosa e insegura interpretación, dado que las propiedades del conjunto difieren grandemente de las partes.

El análisis químico es útil, pero da la composición integral de la arcilla y no informa sobre cómo se distribuyen sus componentes, en el caso de que se trate de arcillas producto de la mezcla de varias clases de minerales. Aún en arcillas puras, formadas por un solo mineral, la composición de éste puede tener variaciones importantes, por lo que los métodos químicos pueden ser de conclusiones inseguras.

Esta identificación se efectuó con el fin de determinar el tipo de mineral que pueda causar expansión, ya que sabemos que las montmorillonitas se expanden considerablemente cuando son húmedas, mientras que las illitas y caolinitas se hinchan menos.

En la práctica ingenieril corriente tales métodos son, por lo general, económicamente inabordables; en su lugar se emplean los ensayos que son objetos de descripción en los párrafos que siguen.

#### III.4. ENSAYO DE IDENTIFICACION BASADOS EN LAS PROPIEDADES INDICE Y LOS LIMITES DE CONSISTENCIA.

Las propiedades índices de los suelos son muy útiles para clasificarlos de acuerdo a sus características de expansividad, lo que nos permite en algunos casos predecir cualitativamente las expansiones.

**Ensayo de dilatación libre.** Se añade lentamente 10 centímetros cúbicos de arcilla que pase el tamiz no. 40 a 100 c.c de agua en una probeta graduada. El volumen del material posado y su jeto ya a expansión se lee 24 horas después por medio de la graduación del cilindro. Según este método, la bentonita puede hincharse a 1.500%, la caolinita, a un 80% y la illita, del 30 al 80%. Algunos investigadores consideran que los suelos que se caracterizan por valores de dilatación libre tan bajos como 100 pueden desarrollar cambios considerables de volumen cuando se humedecen sometidos a carga ligera y deberían, por consiguiente, examinarse con cuidado. Algunas arcillas de Tejas, cuyos valores de libre expansión son solamente de la escala de 50%, originaron, no obstante, dificultades debidas a la expansión.

La prueba de expansión libre no puede dar, por consiguiente, una imagen suficiente clara o exacta de la capacidad de expansión de una arcilla; por lo tanto, y según la importancia de los casos, deberían practicarse uno o varios de los ensayos que se describen a continuación.

Contenido coloidal y valores límites de consistencia, como indicadores de la susceptibilidad de expansión o hinchamiento. — Un alto contenido en materia coloidal indica solamente que existe la posibilidad de la presencia de coloides susceptibles de expansión.

La probabilidad de tal presencia es alta, sin embargo, en aquellas regiones en las que se sabe que existen arcillas del tipo montmorillonita, y donde se observan movimientos y alzamientos o desnivelaciones frecuentes en construcciones y losas de los pi-

mos. Como consecuencia, en tales regiones la combinación o ayuntamiento de un límite bajo de contracción y un índice de alta plasticidad serán indicadores de probable susceptibilidad de hinchamiento. Esto es porque el hinchamiento sólo puede iniciarse si todos los espacios huecos de la arcilla están llenos de agua; de aquí que un valor del límite de contracción señale que el hinchamiento puede iniciarse con un bajo contenido en humedad, un valor elevado del índice de plasticidad es indicio de que la arcilla es capaz de absorber grandes cantidades de agua sin reventar ni agrietarse ante elevados contenidos de humedad.

También existen bastantes criterios para predecir cualitativamente las expansiones.

Para aplicar esos criterios se requiere contar con los siguientes datos:  $I_p$ ,  $LL$ ,  $LC$ ,  $F_d$ ,  $S_s$ , índice coloidal,  $W_i$ .

#### Criterio del Bureau Of Reclamations

En este criterio la expansividad del suelo se determina relacionando el límite líquido, la densidad de sólidos y el peso volumétrico-seco. Graficado en la Fig. III.2.

#### Criterio de Vijayvergiya y Chazzaly.

Ellos relacionaron el porcentaje de expansión y la presión de expansión con el límite líquido, el peso volumétrico seco y el contenido de humedad inicial figuras III.3, a, b, c y d este criterio toma como principal parámetro el contenido de humedad inicial, mientras menor sea mayor es la capacidad expansiva que puede desarrollar la arcilla porque el aumento potencial de contenido de humedad es más grande.

#### Criterio de USBR

Basado en el método de Holtz y Gibbs, el cual considera simultáneamente diversas propiedades de los suelos.

La relación entre estas propiedades y el grado de expansión se muestra en la Fig. III.4.

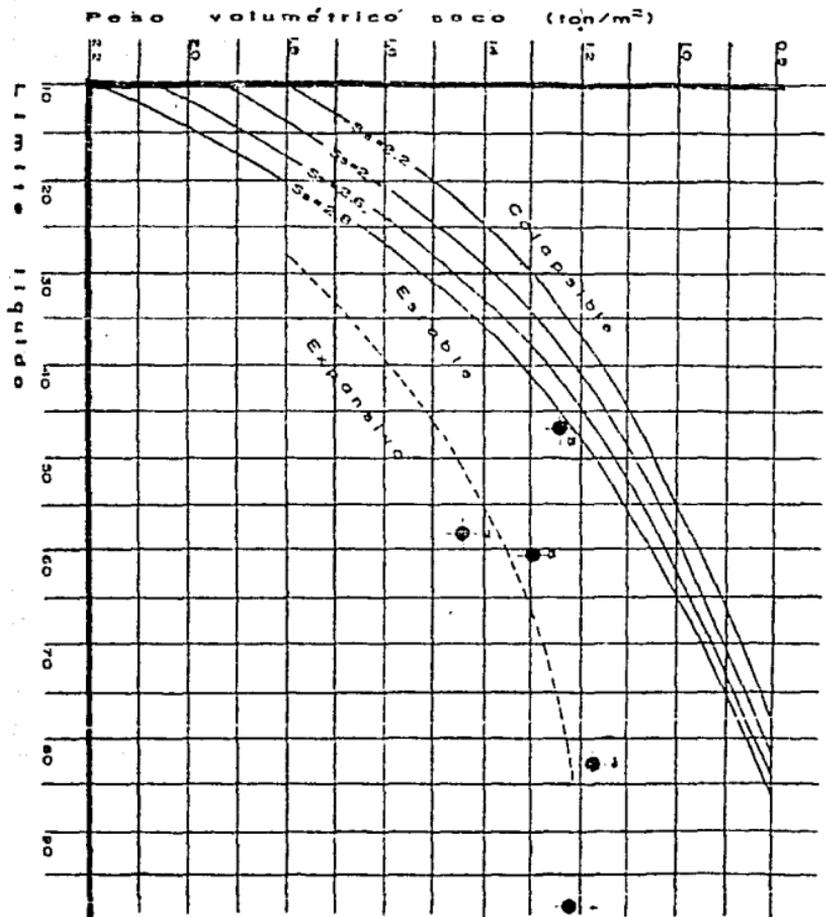
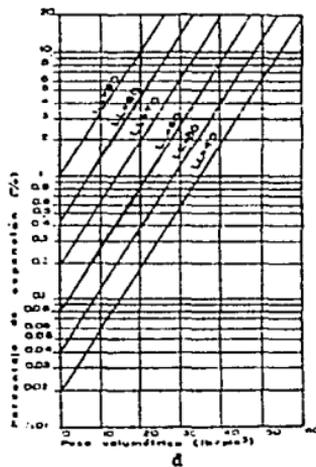
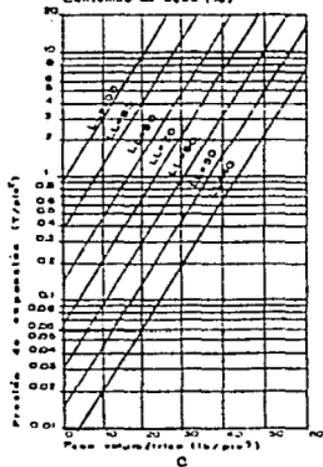
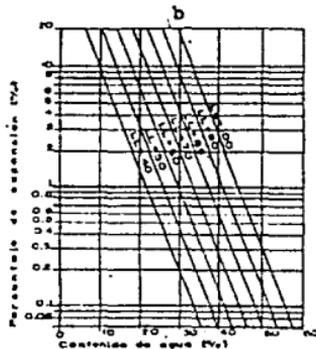
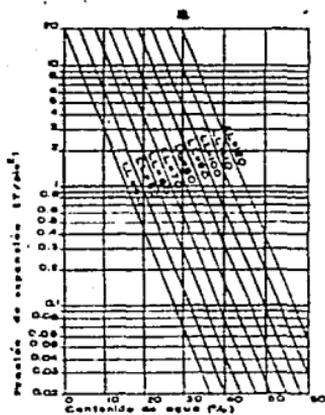
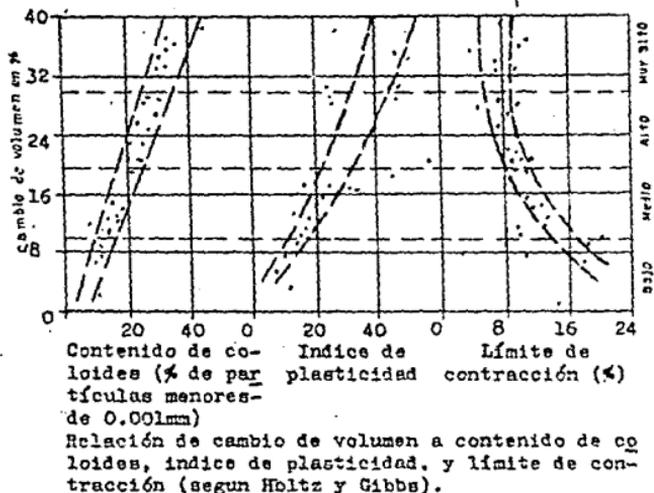


Fig. III.2



Figs. III.3, a, b, c y d..

Fig. III.4



Basada en las curvas presentadas por la figura III.4, Holtz propuso el criterio de identificación de las arcillas expansivas como se muestra en la tabla III.1

Contenido coloidal porcentaje menor de 0.001 mm.	Índice de plasticidad	Límite de contracción	Expansión probable porcentaje total del cambio de volumen.	Grado de expansión
>28	>35	<11	>30	Muy alto.
20-13	25-41	7-12	20-30	Alto.
13-23	15-28	10-16	10-30	Medio.
>15	<18	>15	<10	Bajo.

Basado sobre una carga vertical de 1.0 psi.

Tabla III.1

### III.5. PRUEBAS DIRECTAS

Los métodos de identificación mineralógica y propiedades in dice descritos en el párrafo anterior para identificar suelos expansivos; permiten determinar las características de la expansión de este tipo de suelos, midiendo su susceptibilidad a cambiar de volumen, sin embargo, esta identificación o evaluación es de tipo cualitativa, lo cual no permite conocer la presión que podrá ejercer el suelo al expandirse sobre una estructura desplantada en -- el, y en consecuencia prevenir los posibles daños.

Para obtener un valor numérico que cuantifique esta presión, se hace uso del método directo, el cual es el procedimiento más satisfactorio y conveniente para determinar el potencial de expansión y la presión de expansión de una arcilla expansiva.

Haciendo uso de este método, se puede obtener un parámetro cuantitativo que evalúa la tendencia de un suelo hacia el cambio volumétrico, este parámetro es la llamada presión de expansión.

**LA PRESION DE EXPANSION.**— Se define como la presión requerida para mantener el volumen de una muestra constante, la presión de expansión se considera como la propiedad física básica de un suelo expansivo y deberá usarse para reportar un parámetro cuantitativo de la tendencia de un suelo hacia la expansión.

Es importante comprender otros conceptos que son:

**POTENCIAL DE EXPANSION.**— Es la energía intrínseca que posee un material expansivo, en el que manteniendo invariable su estado de esfuerzos, dicha energía se libera a medida que se inicia la saturación del suelo.

**PORCENTAJE DE EXPANSION.**— Es la expansión vertical medida como un porcentaje de espesor inicial de una muestra de suelo confinada lateralmente y sometida a una pequeña sobrecarga, a la que se inunda y permite absorber agua libremente.

El término "potencial de expansión" se utiliza frecuentemen

te en sustitución del porcentaje de expansión, y aunque no significan lo mismo, deben tomarse como equivalente en muchas ocasiones.

#### METODO DIRECTO.

Las medidas directas de suelos expansivos se pueden realizar con el uso del consolidómetro unidimensional del tipo convencional. El consolidómetro puede ser tipo plataforma, tipo escala o de otros tipos. Las cargas se pueden aplicar con aire como en el caso del consolidómetro combel o por peso directo como en el caso del consolidómetro de cantiliver. La muestra de suelo se coloca entre dos placas porosas y se confina en un anillo metálico.

El diámetro del anillo varía de 5.08 cm a 10.16 cm dependiendo del tipo de dispositivo que se utilice en el muestreo.

Los espesores de la muestra varían de 1.27 cm a 2.54 cm.

La muestra del suelo puede ser inundada desde la base hasta la parte superior. La expansión vertical medida se reporta como un porcentaje del espesor inicial de la muestra y es lo que se conoce como porcentaje de expansión.

Un procedimiento como el anterior permite una evaluación fácil y precisa del potencial de expansión de una arcilla bajo diversas condiciones. Después de que el suelo ha alcanzado su máximo incremento de volumen, se vuelve a cargar de nuevo la muestra y se determina la presión de expansión. De esta manera la presión de expansión se puede valorar fácilmente sin recurrir a aparatos que mantengan constante el volumen del suelo.

Ahora bien en la ejecución de una prueba de expansión las condiciones más importantes que se involucran son las siguientes:

1.- ESTADO DE LA MUESTRA.- Para una muestra inalterada influye las condiciones de la muestra, el método de muestreo y la historia de esfuerzos de la muestra. Para muestra remoldada influye el método de compactación, además el tiempo de curado antes y después de la compactación y el peso volumétrico máximo.

- 2.- **CONTENIDO DE HUMEDAD.**- A más bajo contenido de humedad inicial se tendrán mayores expansiones, el contenido inicial de humedad es afectado por:
- a) el tiempo que se deja la muestra en el anillo antes de humedecerla.
  - b) el grado de evaporación que se permite mientras la muestra está en el anillo.
  - c) la temperatura y humedad del laboratorio.
- 3.- **PRESION DE SOBRECARGA.**- Incrementando la carga aplicada se reducirá la magnitud de la expansión, la presión de sobrecarga que la mayoría de los laboratorios utilizan varía en el rango de  $0.0703 \text{ kg/cm}^2$  a  $0.703 \text{ kg/cm}^2$ .
- 4.- **TIEMPO REQUERIDO.**- El tiempo requerido para complementar totalmente el proceso de expansión pueda variar considerablemente y depende de la permeabilidad de la arcilla, del contenido de agua de la muestra, el peso volumétrico seco máximo y del espesor de la muestra.

Para una muestra inalterada que tienen un espesor de 2.54 cm pueden requerirse varios días completar la expansión total.

#### EXPANSOMETRO DE HVEEN

Este aparato mide la presión que desarrolla, bajo ciertas condiciones un espécimen de suelo al que se le permite absorber agua libre; la prueba se efectúa de tal manera que no se permiten cambios importantes durante ella en el peso específico del suelo. El dispositivo llamado expansómetro de Hveen consiste en un puente metálico calibrado de tal manera que es conocida para cada flecha del puente, la presión que se ejerce desde una placa circular de 10.1 cm (4") apoyada sobre el espécimen, la presión se transmite al puente por medio de un vástago. La presión de expansión se mide saturando al espécimen.

En la Fig. III.5 muestra el esquema del dispositivo de —

Hveem para medir la expansión.

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

- 1.- Se deja en reposo el espécimen, cuando menos media hora o más, después de terminar la prueba de exudación.
- 2.- Se coloca el extensómetro sobre la barra superior del dispositivo de presión de expansión.
- 3.- Se coloca el vástago y el disco perforado sobre la cara del espécimen compactado en el molde.  
Colóquese el molde dentro del aparato de presión de expansión.
- 4.- Se le dan vueltas a la placa giratoria hasta que genere en el espécimen una deformación de sobrecarga de 0.002 cm (0.001").
- 5.- Se ponen aproximadamente 200 cm<sup>3</sup> de agua en el molde sobre el espécimen y dejese que se desarrolle la presión de expansión durante 16 hrs.
- 6.- Al final del tiempo de saturación, se lee la deformación de la barra de acero con una aproximación de 0.00025 cm (0.0001"). Cuando la deformación es mayor de 0.025 cm (0.01") el aparato de presión deberá ser calibrado.
- 7.- Se determina la presión de expansión usando la sig. expresión:

$$P e = K d$$

donde:

Pe = presión de expansión mostrada por el suelo en kg/cm<sup>2</sup>

K = Constante de calibración de la barra de acero kg/cm<sup>2</sup> por 0.00025 cm.

d = deformación en 0.00025 cm (0.0001") leída en el extensómetro.

En este caso se supone que el material tiene un comportamiento elástico lineal, pues se hace válida la ley de Hooke.

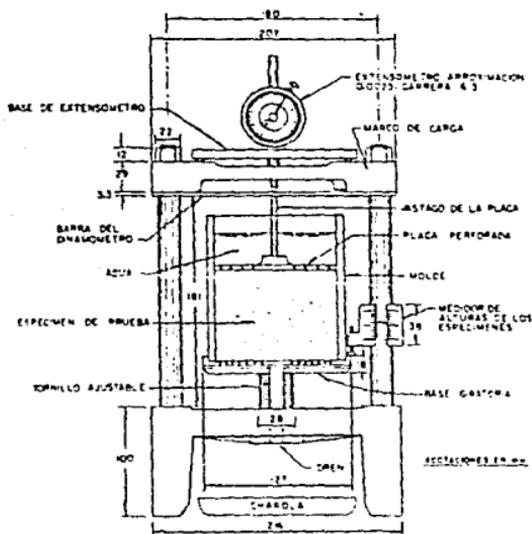


Fig. III.5. Dispositivo para medir la presión de expansión.

**METODO DE PRUEBA SUGERIDO PARA EXPANSION UNIDIMENSIONAL Y PRESION DE EXPANSION DE SUELOS ARCILLOSOS.**

Este método explica como realizar pruebas de expansión sobre muestras inalteradas o muestras de suelos arcillosos compactados - que no tienen partículas de tamaños a 0.048 cm (3/16") que pasan - por la malla no. 4 estandar (A.S.T.M.). La prueba se realiza para determinar:

**I.- ALCANCE**

- I.1.- La magnitud del cambio de volumen bajo condiciones de carga ó sin carga.
- I.2.- La proporción del cambio de volumen.
- I.3.- La influencia de la humedad sobre el cambio de volumen.
- I.4.- La permeabilidad axial de suelos confinados lateralmente bajo carga axial o sin carga durante la expansión. La saturación (sin drenaje) tiene lugar axialmente.

La penetración del agua se efectúa axialmente para determinar el efecto de saturación y permeabilidad. Los especímenes preparados para esta prueba también usarse para determinar - la contracción vertical ó volumétrica en la medida en que el contenido de agua disminuye.

El cambio total de volumen para suelos expansivos se determina a partir de la expansión, más los valores de contracción para los diferentes rangos del contenido de agua. Los datos de la prueba de expansión pueden usarse para determinar el alcance y la proporción del levantamiento del terreno bajo - estructuras ó en estructuras de tierra, las pruebas se pueden usar para estimar los cambios de volumen que ocurrirán - en los suelos sujetos a secado, siempre que las condiciones naturales y condiciones de operaciones se dupliquen.

**II.- SIGNIFICADO.**

- II.1.- Las características de expansión de una masa de suelo, son función de varios factores, algunos de estos son el tamaño y

la forma de las partículas del suelo, el contenido de humedad, la densidad, las cargas aplicadas, la historia de carga y las propiedades mineralógicas y químicas.

Debido a la dificultad para evaluar estos factores individuales, las propiedades de cambio de volumen no se pueden predecir con ningún grado de confianza, si no se realizan pruebas de laboratorio. Cuando los problemas de expansión son críticos, es importante ensayar muestras de los sitios que se estén considerando.

- II.2.- Las pruebas de laboratorio que se describen aquí tienen por objeto el estudio de los suelos que no tienen partículas mayores que el tamaño de la mayor estandar (3/16"). Si la prueba se realiza sobre la fracción que pasa la malla No. 4 en suelos que contienen material granular (de tamaños mayores que la malla No. 4), algunos ajustes se requieren en cualquier análisis. Las partículas granulares reducen el cambio de volumen porque reemplazan la fracción activa del suelo.

### III.- APARATOS.

- III.1.- Consolidómetros.- Los consolidómetros convencionales de laboratorio, la mayoría de ellos son de tipos de anillo fijo y anillo flotante, cualquiera de los dos es adecuado.

En el anillo fijo, todos los movimientos del espécimen relativos al recipiente, son ascendentes durante la expansión.

En el anillo flotante el movimiento de la muestra de suelo es hacia arriba y hacia abajo, alejándose del centro durante la expansión. Un micrómetro para medir la expansión.

- III.2.- Dispositivo de carga.- Se requiere un dispositivo adecuado para la aplicación de las cargas verticales al espécimen. El dispositivo de carga puede ser una báscula de plataforma de 454 kg (1000 Lb), al 1361 kg (3000Lb) de capacidad, montada sobre un pedestal y equipada con un gasto, fijo bajo el marco. El gasto opera un balancín puede bajar o su-

bir, el gasto y de esta forma se aplica ó se retira la carga al espécimen del suelo.

Otro dispositivo adecuado la carga utiliza pesas y un sistema de palancas para la manipulación de varias pruebas simultáneamente. Un pistón hidráulico ó, aparato de carga del tipo fuelle, son también muy satisfactorios.

III.3.- Dispositivo para labrar especímenes inalterados.- Este aparato de una hoja de corte del mismo diámetro que el anillo del consolidómetro, una mesa de corte con barras guías y cuchillos para labrar la muestra.

III.4.- Dispositivos para la preparación de especímenes remoldeados.- Los especímenes de suelo compactado se preparan en el anillo del consolidómetro. Además del anillo el aparato. Un pisón de compactación de 2.5 kg (5.5 lb) y altura de caída de 30.5 cm (12").

#### IV.- PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA.

IV.1.- Muestras inalteradas.- Las pruebas se ejecutan sobre muestras cúbicas labradas a mano ó sobre muestras que permitan el corte de aproximación de 1.27 cm, de material de los lados de la misma. Alternativamente se obtiene una muestra cilíndrica, que tenga un diámetro igual al diámetro del consolidómetro y se coloca dentro del recipiente. Se coloca la muestra cúbica ó cilíndrica de suelo inalterado sobre la plataforma de corte, fijando la hoja de corte al anillo del consolidómetro, y eliminando el exceso de material con un cuchillo dejando muy poco material para la hoja devastadora cuando se presione suavemente hacia abajo, otros procedimientos adecuados para adaptar las muestras son: Sierras de arco, tornos de labrado, ó dispositivos de extrusión que se pueden emplear de acuerdo con el uso de otros aparatos y muestras.

En el labrado de las muestras se debe tener cuidado para mi-  
nimizar las alteraciones del espécimen de suelo y asegurar -  
 un ajuste exacto del mismo, al anillo del consolidómetro. —  
 cuando se ha preparado suficiente espécimen, de tal manera -  
 que sobresalga a través del anillo del consolidómetro, se en  
 rasa al nivel de la superficie del anillo con una regla co  
 rtante. Se coloca una placa de vidrio sobre la parte plana re  
 cortada del espécimen y se voltea el recipiente, se retira -  
 la hoja cortante, se recorta el espécimen nivelando con la -  
 superficie del anillo del consolidómetro, y se cubre con una  
 segunda capa de vidrio para controlar la evaporación hasta -  
 colocarlo en el dispositivo de carga.

IV.2.-Muestras alteradas.- Se usa aproximadamente 908 gr de suelo-  
 representativo (2 lb), que ha sido adecuadamente humedecido-  
 al grado deseado y libre de protuberancias, y del cual se --  
 han eliminado aquellas partículas ó agregados retenidos por-  
 la malla no.4. Se compacta el espécimen a la densidad volu-  
 métrica requerida, después de agregar la cantidad de agua ne-  
 cesaria. Se coloca la extensión (el collarín) sobre la super-  
 ficie del anillo del consolidómetro y se asegura la parte ba-  
 ja del anillo a una placa metálica. Se pesa la cantidad exac-  
 ta de la muestra preparada hasta dar su densidad de aire de-  
 seada cuando se compacta hasta un espesor de 6.35mm (1/4") -  
 mayor que el espesor del anillo del consolidómetro. Se com-  
 pacta el espécimen con el pisón de compactación hasta el es-  
 pesor deseado. Se quita el collarín y se enrasa el exceso de  
 material que sobresale con una regla cortante, se retira el-  
 espécimen y el anillo de la base metálica y se cubren las su-  
 perficies con placa de vidrio hasta que el espécimen se colo-  
 ca en el aparato de carga. Si después de pesado, medido el -  
 volumen y calculada la densidad húmeda, no esta dentro de --  
 16.02 kg/cm<sup>3</sup> (1.0 Lb/pie), que se necesita se repite la pre-  
 paración de los especímenes remoldeados hasta obtener la ---

aproximación requerida.

IV.3.- Calibración del micrómetro para medir desplazamientos.- Antes de colocar el espécimen de suelo en el anillo del consolidómetro se coloca un anillo calibrador en el recipiente de la muestra, con la misma disposición de las piedras porosas y placas de carga, que se usarán cuando se pruebe el espécimen. Se coloca el conjunto de piezas en la máquina de carga en la posición que ocupará durante la prueba. Después de que estos dispositivos han sido ensablados con el anillo calibrador en su lugar, se aplica una carga equivalente a una presión de  $0.025 \text{ kg/cm}^2$  ( $0.35 \text{ Lb/pulg}^2$ ) Sobre el espécimen de suelo. La lectura del micrómetro en este momento será la altura exacta del anillo calibrador. Marcando las partes del aparato para que se puedan hacer coincidir en la misma posición para la prueba.

IV.4.- Altura inicial y peso del espécimen de suelo.- Antes de que el espécimen se inserte en el recipiente, se limpia y se pesan el anillo del consolidómetro y las placas de vidrio a  $\pm 0.01 \text{ gra}$ . Se coloca la muestra en el conjunto y se vuelve a pesar el espécimen de suelo + el anillo de consolidómetro y las placas de vidrio a  $\pm 0.01 \text{ gr}$ . Se determina el peso del espécimen de suelo.

Se acoplan las piezas al recipiente del espécimen y se coloca el conjunto en el dispositivo de carga. Si el espécimen no está saturado al inicio de la prueba, se coloca una cubierta de hule sobre las piedras porosas y las placas de carga para prevenir la evaporación. Se aplica una pequeña carga base de  $0.025 \text{ kg/cm}^2$  ( $0.35 \text{ Lb/pulg}^2$ ) al espécimen.

Comparando la lectura del micrómetro en este momento con la lectura obtenida con el anillo calibrador en su lugar, se determina la altura exacta del espécimen. Este dato se usa para determinar el volumen inicial del espécimen, la densi-

dad inicial, la relación de vacíos, contenido de humedad y grado de saturación. El verdadero contenido de agua del espécimen se determinará cuando se obtenga el peso seco total al final de la prueba.

IV.5.- Datos de saturación y permeabilidad.- para saturar la muestra se fija el tubo de alimentación se llena con agua y se humedece la muestra. Después de que el espécimen se ha humedecido se llena la cazuela con agua. Luego que la saturación ha sido completada se pueden tomar lecturas de la permeabilidad en cualquier momento de la prueba. Llenando el tubo de alimentación a una lectura inicial y permitiendo que el agua filtre a través del suelo. Se evalúa la cantidad de agua que fluye a través de la muestra en un tiempo dado mediante la caída de presión hidrostática (diferencia de niveles).

IV.6.- Prueba de expansión.

IV.6.1.- Comentarios generales.- Las características de expansión de un suelo expansivo varían con la historia de cargas, — así que es necesario realizar una prueba por separado ó varios especímenes para cada una de las condiciones de carga, para las cuales se requieren datos de expansión exactos. Sin embargo, un procedimiento es probar solo dos especímenes: 1) cargando y expandiendo y 2) expandiendo y cargando. De estos datos se pueden hacer una estimación de la expansión para cualquier condición de carga como se muestra en la curva c de la Fig. III.6, en la cual el espécimen No. 1 fue cargado y expandido por la saturación con agua, y el espécimen No. 2 (curva B) fue expandido por saturación con agua y luego cargado (curva A).

IV.6.2.- Cargando el espécimen y luego dejándolo expandir.- Para medir la expansión característica. Cuando el espécimen de suelo está saturado bajo carga total y luego se permite la expansión, se aplica la carga de  $0.025 \text{ kg/cm}^2$  ( $0.35 \text{ Lb/pulg}^2$ )

al espécimen No. 1, y se fijan lecturas iniciales en el micrómetro. Luego se satura el espécimen de suelo. Cuando el espécimen empieza a expandirse se incrementa la carga que se requiere para mantener el espécimen a su altura original. Luego se reduce la carga a 1/2, 1/4 y 1/8 de la máxima carga, y finalmente a la carga de  $0.025 \text{ kg/cm}^2$ , y se miden las alturas para cada una de las cargas. Usando un mayor número de cargas si se requiere más detalles en la curva de la prueba. Manteniendo todas las cargas por 24 hrs. ó más tiempo si es necesario hasta obtener valores constantes de altura. Se remueve el espécimen del anillo del consolidómetro y pesando inmediatamente, se vuelve a pesar después de sacarlo a  $105^\circ\text{C}$ . A partir del contenido de agua, peso volumétrico seco, y gravedad específica. Se calcula el volumen de aire y suponiendo que es el mismo que el volumen de aire que sigue a la determinación de la permeabilidad, se calcula el contenido de agua y el grado de saturación.

IV.6.3.- Dejando expandir el espécimen y luego cargándolo.- para medir las características de expansión cuando se permite que el suelo se expanda antes de cargarlo se aplica la carga base de  $0.025 \text{ kg/cm}^2$  ( $0.35 \text{ Lb/pulg}^2$ ) al espécimen No. 2 y se fija una lectura inicial en el micrómetro, después se satura el espécimen.

Se permite que el espécimen se expanda bajo la carga base por 48 hrs. ó hasta que la expansión se complete. Se carga el espécimen sucesivamente a 1/8, 1/4, 1/2 y 1 vez la máxima carga encontrada en 4.6.2. Hasta determinar las características de preconsolidación del suelo. Se sigue el procedimiento indicado en 4.5.2 para aplicar las cargas y efectuar las demás mediciones y determinaciones.

IV.6.4.- Para condiciones especiales de carga.- Cuando se requiere realizar pruebas de expansión por separado para otras condiciones de carga se aplica la carga base de  $0.025 \text{ kg/cm}^2$ ,

al espécimen y se mide la altura inicial, y se carga el espécimen a la carga deseada, se satura el espécimen y se permite que el espécimen se expanda bajo la carga aplicada por 48 hrs. ó hasta que se complete la expansión. Se mide la altura del espécimen expandido se reduce la carga base hasta que de la carga base. Se permite que la altura llegue a ser constante y se mide; Luego se remueve el espécimen del anillo y se efectúa las determinaciones especificadas en 4.6.2.

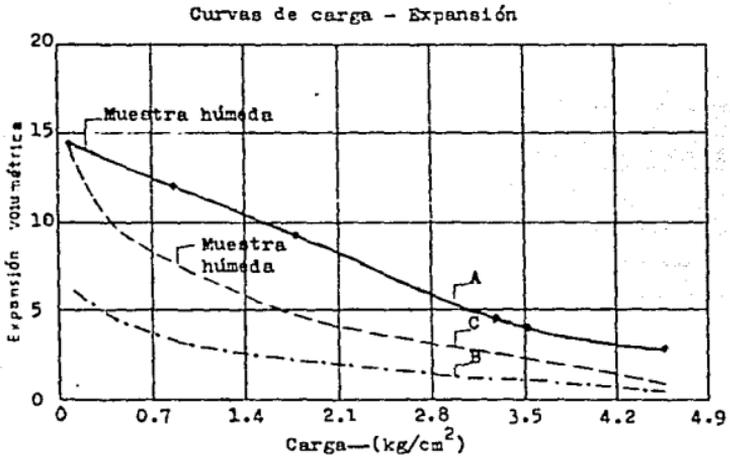


Fig. III.6

## CAPITULO IV

## PLANEACION DE LA INVESTIGACION

## IV.1 INTRODUCCION

Las obras de tierra son unas de las más antiguas estructuras construidas por el hombre. Antes de la era cristiana, los chinos - ya tenían bordos de gran longitud y compactaban la tierra con varas de carrizo. Los hindués construyeron la presa Madduk-Masur, - desde el año 500 AC de 33 m de altura. Los aztecas, en 1450 DC - construyeron presas en el valle de México para protegerse de inundaciones, siendo el albarradón que dividía los lagos de Texcoco y-Xaltocan una de esas estructuras.

A principios del siglo pasado, se empezaron a construir pequeñas presas de tierra en Estados Unidos de Norteamérica, para abastecimiento de agua. En realidad, se popularizan estas construcciones con la expansión del riego en los últimos 40 años, algo semejante se registra en México, a raíz de la creación de la Comisión Nacional de Irrigación en 1926 (hoy Secretaría de Recursos Hidráulicos). Esta dependencia ha construido la mayoría de las presas de México; como también la Comisión Federal de Electricidad ha realizado obras de este tipo. Además, la Secretaría de Agricultura y Ganadería ha contribuido a su desarrollo con obras de tamaño reducido (pequeñas presas, bordos y cajas de agua).

La compactación de la tierra fue aplicada en Europa a principios del siglo XIX. En Inglaterra, hacia 1820, se usaron rebaños - de ovejas; posteriormente, rodillos pesados de concreto o fierro.- Esta práctica fue llevada a California EUA, por ingenieros europeos y aplicada en 1860. En este mismo estado se desarrolló el rodillo pata-de-cabra (1905), con clavos de durmiente de unos 15 cm de longitud. Los resultados fueron muy buenos.

En aquel entonces no se conocía la influencia del contenido de agua del suelo en la compactación. Varias presas de Estados Unidos fallaron al entrar en operación por no controlar la humedad del suelo compactado.

En 1933, año en que Proctor publicó los resultados de sus estudios sobre compactación, los ingenieros comprendieron la importancia de ciertos parámetros como la humedad óptima y la energía de compactación en las propiedades mecánicas de los suelos. Los nuevos conceptos se difundieron rápidamente y, con variantes.

La compactación se introdujo como un medio para reducir la deformabilidad, y mejorar la estabilidad y disminuir la permeabilidad y susceptibilidad de los suelos a la erosión por el agua; como consecuencia del auge en la construcción de obras de tierra, en la cuarta década del siglo XX se iniciaron los esfuerzos por racionalizar la compactación en diferentes partes del mundo (Kelso, 1936), en Estados Unidos de Norteamérica (Proctor 1933). Estas investigaciones condujeron al establecimiento de métodos para la especificación y verificación de los trabajos de campo, por medio del uso de patrones de compactación en el laboratorio.

Estos patrones se fijaron, de acuerdo a las necesidades específicas y procedimientos de construcción de la época.

La compactación no es solo un medio para lograr las propiedades adecuadas, como ya lo sabían los primeros constructores de presas. La función de las pruebas de compactación de laboratorio es permitir la especificación racional y el control de los trabajos de campo, mediante el estudio de las propiedades mecánicas de los suelos compactados y de sus relaciones con ciertas propiedades índices de fácil determinación. Esta función solo en la medida en que los procedimientos de compactación en el laboratorio permiten reproducir o asemejar, las condiciones de campo; principalmente el mecanismo y la energía de compactación.

La compactación de los suelos finos en el terraplén de una -

presa generalmente se compactan con rodillos pata de cabra o con rodillos de llantas neumáticas. También se usan compactadores manuales para tratar áreas reducidas de difícil acceso.

Cualquiera que sea el tipo de compactación empleado, los resultados en un suelo dado dependen de los factores; los más principales son el contenido de agua y la energía de compactación, determinada principalmente por la presión y el área de contacto rodillo suelo, el espesor de la capa compactada y el número de pasadas del equipo.

**Compactación de laboratorio.** Con la finalidad de estudiar — las diferentes variables que afectan la compactación, verificar la compactación de campo y producir espécimen de igual peso volumétrico y mismo contenido de agua que los de campo, que permita determinar las propiedades mecánicas de suelos compactados, se han desarrollado diversos procedimientos de compactación de laboratorio. — Los más usuales son de compactación por impactos, amasado y carga-estática.

Compactación por impactos, cada capa se compacta con cierto número de golpes uniformemente distribuidos de un martillo con peso, dimensiones y caída libre dados. En este caso la energía específica de compactación puede estimarse en forma aproximada conociendo el volumen del molde, el número de capas, el número de golpes por capa, el peso y la altura de caída del martillo. El valor de cada una de las variables mencionadas puede hacerse cambiar según convenga a fin de reproducir en cada caso las condiciones de compactación de campo.

Compactación por amasado, cada capa se compacta mediante cierto número de aplicación de carga con un pisón que produce presiones que varía gradualmente de cero a cierto valor máximo y luego en sentido contrario. La energía de compactación no puede cuantificarse en forma simple de la compactación por impactos; pero puede hacerse variar uno o más de los factores fuerza máxima de apisonado, núme-

ro de capas, número de pisadas por capa, área del pisón y tamaño - del molde. El tipo de compactación por amasado de mayor uso es el Harvard miniatura.

Compactación estática, a cada capa se le aplica durante cierto — tiempo una presión especificada mediante un pisón que cubre toda — el área del cilindro de compactación. La energía de compactación — se puede modificar haciendo variar el tamaño del molde, el número de capas, la presión aplicada a cada capa y el tiempo de aplica— ción.

En las obras de tierra, se observan con frecuencia fallas o serias deficiencias cuando no se considera adecuadamente el contenido de agua, sobre todo en los suelos finos compactados que dan — como consecuencia importantes cambios volumétricos y pérdidas de — resistencia al esfuerzo cortante. Esto es muy notorio como en el — caso de canales. En la práctica generalizada al compactar un suelo lo más que se pueda se dice que es más resistente e indeformable, — pero, cuando se trata de suelos finos arcillosos, se está fabricando una estructura volumétrica inestable. Es decir cuando el suelo — absorbe agua libremente, su humedad aumenta a tal grado que se pre — sentan cambios volumétricos indeseables y se reduce la resistencia al esfuerzo cortante.

En un suelo compactado o en estado natural, se mide el acom — do de sus partículas con el llamado grado de compactación, definido como la relación entre dos pesos volumétricos secos: el que tie — ne el suelo y el máximo adoptado. Expresado en por ciento.

El grado o porcentaje de compactación, no es un indicador — universal, sino que depende de la organización que establezca la — escala de valores. Por ejemplo, el 100 % de compactación de la — SAROP es diferente al de la SARH y al del USER o cualquier otro or — ganismo oficial o privado, debido a que las normas de compactación que determinan el peso volumétrico seco máximo son diferentes en — cada caso.

Como se ha dicho, que uno de los problemas principales de los bordos de contención, es la infiltración, se deben construir con materiales de baja permeabilidad, para que se impida el paso del agua a través de ellos y su trabajo sea eficiente.

Debido a lo anterior es necesario dar una solución satisfactoria a estos problemas, por lo que es necesario efectuar estudios de Mecánica de Suelos para conocer las características del suelo de desplante, así como el estudio de los materiales a emplear en la construcción del bordo, ya que presentan características diferentes de acuerdo a su formación geológica.

Una solución practica para reducir el flujo de agua de los bordos de contención de las obras pequeñas, es la utilización de un material impermeable, o sea que minimice el paso del agua a través de su masa. El material que tiene esta característica es la arcilla que es un material plástico y de baja permeabilidad.

Este suelo proviene principalmente de la descomposición química de las rocas, por la acción de agentes que modifican su constitución mineralógica ó química. El principal agente es, desde luego, el agua y los mecanismos de ataque más importantes son: la oxidación, la hidratación y la carbonatación. Los efectos químicos de la vegetación juegan un papel muy importante. Estos mecanismos comúnmente producen arcilla como último producto de descomposición.

Sin embargo este material como se ha mencionado anteriormente presenta una desventaja: la expansión ó aumento de volumen; a medida que adquiere agua. Este problema es muy presente, cuando en la construcción de los bordos se emplean este tipo de material que va a estar en contacto con el agua.

El objetivo principal del presente trabajo de investigación; es conocer el comportamiento del suelo al estar en contacto con agua, incluyendo el consiguiente aumento de volumen debido a la sa-

turación, por lo que se propone: utilizar tres tipos de material arcilloso, elaborando especímenes con diferentes grados de compactación, variando el contenido de agua. Las características que queremos determinar en el suelo se obtienen por medio de las pruebas de Permeabilidad y Expansión; por lo tanto los especímenes mencionados se someterán a este tipo de pruebas. Estos especímenes se elaborarán compactándolos en forma estática (por medio de presión) en el molde porter y en la cámara del equipo de permeabilidad forzada, en lo que se reproducirá el peso volumétrico para grados de compactación de: 90 %, 95 %, 100 % y 110 % ; la prueba de proctor 30 golpes.

La prueba de expansión se realizará con seis especímenes a tres de los cuales se les colocará una sobrecarga, y a los tres restantes se les dejará expandir en forma libre.

Para cada grado de compactación se tendrán tres contenido diferentes de humedad y se realizarán pruebas de permeabilidad forzada, expansión libre y expansión con sobrecarga.

La humedad mencionada será de las siguientes condiciones:

$$W_o - 1.5 \% \qquad W_o \qquad W_o + 1.5 \%$$

(humedad óptima menos 1.5 %, humedad óptima y humedad óptima más - 1.5 %).

#### IV.2 SELECCION DE MATERIAL PARA EL ESTUDIO

Para llevar a cabo esta investigación, fue necesario elegir - el tipo de material adecuado para dar solución a este problema de - infiltración.

Como se sabe que la arcilla es el material que resuelve el - problema por ser el más impermeable, basándose en esto se llevo a - la determinación de contar con este tipo de suelo, pero no quiere - decir que empleando este material el problema ya esté solucionado - por completo, si no se necesita conocer cual es su comportamiento - de estos materiales en cuanto a permeabilidad y expansión, cuando - tienen diferentes humedades con el mismo grado de compactación y - cuando es diferente dicho grado.

Como los materiales arcillosos presentan diferentes caracterí-  
ticas de plasticidad, fue necesario estudiar tres clases de materia-  
les de distintas zonas, así poder comparar los resultados de permea-  
bilidad y expansión que se obtengan para cada uno de ellos.

Los tres diferentes materiales arcillosos son:  
arcilla café clara, arcilla café oscura y arcilla gris, los prime-  
ros dos materiales fueron muestreados en la población de Jilotepec-  
ubicada en el Estado de México y la arcilla gris se extrajo de un -  
terreno localizado en la zona de Cuauhtepc en el Distrito Federal.-

A estas muestras que se obtuvieron en forma alterada, utili-  
zando pico y pala, se les realizaron las siguientes pruebas índice-  
de laboratorio: Límites de Atterberg o de consistencia, Granulome-  
tría y de Compactación Proctor (30 golpes), para posteriormente rea-  
lizar las pruebas de permeabilidad y expansión.

A continuación se describen las pruebas índice y mecánicas mencio-  
nadas que se realizaron en esta investigación.

#### IV.3 PRUEBAS DE LABORATORIO

##### DETERMINACION DE LOS LIMITES DE PLASTICIDAD Y DE LA CONTRACCION LINEAL

La finalidad de esta prueba es conocer las características de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla Núm. 40 cuyos resultados se utilizan principalmente para la identificación y clasificación de los suelos.

La plasticidad es la propiedad de algunos suelos que les permite, bajo ciertas condiciones de humedad, mantener la deformación producida por un esfuerzo que les ha sido aplicado en forma rápida, sin agrietarse, desmoronarse o sufrir cambios volumétricos apreciables.

A. Atterberg introdujo los límites de humedad para cuatro estados de consistencia en que se pueden presentar en los materiales que son: Límite líquido, Límite plástico y Límite de contracción. - El primero es la humedad correspondiente para que el material pase el estado semilíquido y al plástico; el segundo, es la humedad correspondiente entre el plástico y semisólido; el tercero, separa el estado semisólido y el sólido. A estos límites se les llama de consistencia.

Para la determinación de estos límites se emplea el método es tándar de casagrande, el cual define como límite líquido el contenido de agua de la fracción del suelo que pasa la malla Núm. 40 cuando se coloca en la copa de casagrande y efectuar en ella una ranura trapecial de dimensiones especificadas, los bordes inferiores de la misma se ponen en contacto en una longitud de 13 mm; despues de golpear la copa 25 veces, dejando caer contra una superficie dura de características especiales, a una altura de 1 cm; a la velocidad de 2 golpes por segundo.

Límite plástico se define como el mínimo contenido de agua de la fracción de suelo que pasa la malla Núm. 40, para que pueda formar en ella cilindros de 3 mm. sin que se rompan ó desmoronen.

La contracción lineal se define como la reducción en la mayor dimensión de un espécimen de forma primitica rectangular, elaborado con la fracción de suelo que pasa la malla Núm. 40, cuando su humedad disminuye desde la correspondiente al límite líquido hasta la del límite de contracción, expresada dicha reducción como un porcentaje de la longitud inicial del espécimen.

El equipo y materiales necesarios son los siguientes:

- 1.- Cápsula de porcelana de 12 cm. de diámetro.
- 2.- Espátula de hoja de acero flexible de 7.5 cm. de longitud y 2 cm. de ancho, con punta redonda.
- 3.- Cuentagotas.
- 4.- Copa de casagrande calibrada para una altura de 1 cm; ranurados uno plano y otro curvo.
- 5.- Vidrio de reloj.
- 6.- Balanza de 200 g. de capacidad y 0.01 g. de aproximación.
- 7.- Horno con termostato.
- 8.- Desecador de cristal.
- 9.- Vaso o recipiente.
- 10.- Franela.
- 11.- Placa de vidrio con dimensiones mínimas aproximadas de 40 por 40 cm. de lado y 0.6 cm. de espesor.
- 12.- Molde de lámina galvanizada del Núm. 16, con sección de dos por dos cm. y de 10 cm. de longitud.
- 13.- Calibrador con vernier del tipo Mäuser.
- 14.- Grasa grafitada.

#### P R O C E D I M I E N T O

- 1.- Se prepara 250 g. de material previamente cribado por la malla Núm. 40, se coloca en una cápsula de porcelana, se le agrega agua en la cantidad necesaria y se deja en reposo durante 24 ho-

ras aproximadamente, en un lugar fresco, cubriendo con un paño que se mantenga húmedo para reducir la pérdida de agua por evaporación.

- 2.- Una vez transcurrido este lapso, se toma una porción de 150 g. - aproximadamente de material, se coloca en otra cápsula de porce- lana y se homogeneiza con la espátula.
- 3.- Se coloca en la copa de casagrande, previamente calibrada, una- cantidad suficiente de material se extiende por medio de la es- pátula con un espesor de 8 a 10 mm. en la parte central de la - muestra colocada. El material se extiende del centro hacia los- lados, sin aplicarle mucha presión y con el mínimo de pasadas - de la espátula.
- 4.- Se efectúa una ranura en la parte central del material que con- tiene la copa, con una pasada firme del ranurador, manteniend- lo siempre normal a la superficie interior de la copa.
- 5.- Se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa, a - razón de 2 golpes por segundo y se registra los números de gol- pes que se logra en cerrar íntimamente la muestra en una longi- tud de 13 mm.
- 6.- Se toma con la espátula aproximadamente 10 g. de este material- colocándolo en un vidrio de reloj y se procede a pesar el vi- drio de reloj y muestra, conociendo con anterioridad el peso - del vidrio reloj, se registran estos datos se coloca la muestra en el horno a una temperatura de  $105 \pm 5$  C, hasta obtener un pe- so constante, lo cual puede ocurrir en un lapso aproximado de - 16 horas.
- 7.- A continuación se regresa a la cápsula de mezclado el material- que contiene la copa, se limpia la copa y el ranurador con una- franela húmeda.
- 8.- En seguida se agrega agua con el cuentagotas al material conte- nido en la cápsula, se homogeneiza con la espátula y se reali- zan las etapas anteriores.

- 9.- La cantidad de agua que se agrega al material deberá ser en tal forma que las cuatro determinaciones efectuadas queden comprendidas entre 10 y 35 golpes, siendo necesario obtener 2 valores arriba y 2 abajo de 25 golpes.
- 10.-Se determina el límite plástico, se toma una porción de material formando una pequeña esfera de aproximadamente de 12 mm. de diámetro se moldea con los dedos para que pierda humedad y forme un cilindro manipulando con la palma de la mano, aplicando con los dedos la presión necesaria.
- 11.-Se rola el cilindro con los dedos sobre la placa de vidrio, presionándolo para reducir su diámetro en toda su longitud y ligeramente mayor de 3 mm. La velocidad de rolado debe ser de 60 a 80 ciclos por minuto.
- 12.-Cuando se alcanza el diámetro de 3 mm; el cilindro no se rompe en varias secciones, su humedad es superior a la del límite plástico, se junta el material y nuevamente se hace la esfera para que pierda agua, se repiten todas las operaciones mencionadas del límite plástico, hasta que el cilindro se rompa en varios segmentos a los 3 mm.
- 13.-En seguida se colocan en un vidrio de reloj todos los fragmentos, se pasa vidrio más fragmentos y se mete al horno para determinar la humedad, para mayor seguridad en los resultados como mínimo se hacen 2 determinaciones.
- 14.-Contracción lineal, se agrega a la muestra agua o material mojado, tomando de la porción preparada o el material que haya sobrado de la determinación del límite líquido, hasta lograr que la humedad sea la correspondiente a la del límite líquido, se emplea la copa de casagrande al cerrar en una longitud de 13 mm. a los 25 golpes.
- 15.-Se procede a llenar el molde de prueba, al cual se le habrá aplicado una capa delgada de grasa. El llenado del molde se efectúa en 3 capas utilizando la espátula y golpeándolo después

de cada capa para sacar el aire contenido.

16.-A continuación se enrasa el material en el molde utilizando la espátula y se deja orear a la sombra hasta que cambie ligeramente su color, después se coloca al horno, durante 18 horas aproximadamente a una temperatura de  $105 \pm 5$  °C.

17.-Finalmente transcurrido el tiempo de secado, se extraen las muestras del horno y se colocan en el desecador de cristal para enfriar, logrado esto se pesan todas las muestras secas y se registran los pesos, excepto la de contracción lineal, se saca la muestra del molde y se toman las dimensiones tanto de la muestra como del molde con un calibrador.

Los límites de plasticidad se calculan con la siguiente fórmula:

Donde: W = contenido de agua en %

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_t} \times 100$$

W<sub>1</sub> = peso de la muestra húmeda mas el peso del recipiente  
 W<sub>2</sub> = peso de la muestra seca mas el peso del recipiente  
 W<sub>t</sub> = peso del recipiente

18.-Al obtener las humedades del límite líquido se dibujan los puntos en un papel semilogarítmico, Núm. de golpes-humedad se traza la línea recta que pase lo más cerca posible de cuando menos 3 de los puntos obtenidos, llamada esta línea curva de fluidez. Localizando la humedad que le corresponde a los 25 golpes que es el límite líquido.

El índice plástica se calcula:  $I_p = LL - LP$

Contracción lineal

Donde: CL = contracción lineal en %

$$CL = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100$$

L<sub>i</sub> = longitud inicial de la barra de suelo húmedo  
 L<sub>f</sub> = longitud media de la barra de suelo seco

## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El análisis granulométrico de un suelo consiste en separar y clasificar por tamaños los granos que lo componen, utilizando el procedimiento de cribado, es decir, haciendo pasar el material a través de un juego de mallas de aberturas cuadradas.

En esta determinación se empleó la composición granulométrica chica, ya que estos tipos de materiales son finos y pasan por la malla N.º 4, se utilizaron las mallas N.ºs. 10, 20, 40, 60, 100, 200, charola y tapa.

Equipo y materiales empleados son los siguientes:

- 1.- Balanza de 2 kg. de capacidad y 0.1 de aproximación.
- 2.- Charola de lámina.
- 3.- Cucharón de lámina.
- 4.- Horno con termostato.
- 5.- Cepillo de cerdas.
- 6.- Cepillo de alambre delgado.
- 7.- Desecador de cristal.
- 8.- Juego de mallas, tapa y fondo.
- 9.- Vaso de aluminio de un litro.
- 10.- Agitador de varilla metálica.

## P R O C E D I M I E N T O

- 1.- Se toma una porción de material, se hace el procedimiento de cuarteo que tiene por objeto de obtener de una muestra porciones representativas de tamaño adecuado.
- 2.- El material se coloca en una mesa lisa y limpia, se revuelve con un cucharón hasta que presente un aspecto homogéneo, se forma un cono encajando el cucharón hacia abajo y haciendo girar al rededor del eje del cono, con el fin de desalojar el material convirtiendo este en cono truncado; se separa en cuadrantes.

ces con una regla, se mezclan dos cuadrantes y se vuelve a cuartear y así sucesivamente hasta obtener el peso aproximado de — 200 g.

- 3.- Del material sobrante se toma una porción se coloca en un recipiente se pesa y se registra colocandolo en el horno para conocer su respectiva humedad.
- 4.- La muestra equivalente de 200 g. se coloca en un vaso de aluminio se le agrega 500 cm<sup>3</sup> de agua aproximadamente, se deja en reposo durante 12 horas como mínimo.
- 5.- Transcurrido este lapso, se lava la muestra a través de la malla Núm. 200, se agita el contenido del vaso con una varilla durante 15 seg. se decanta la suspensión sobre la malla, y el material que queda en la malla se regresa en el vaso con un chorro de agua, se repite ésta operación hasta que el agua salga limpia.
- 6.- Se seca el material en el mismo vaso dejandolo en el horno un lapso no menor de 16 horas a una temperatura de 105±5 °C, hasta obtener un peso constante. Se pesa, y se corrige el peso inicial de acuerdo a la humedad que tenía este material, ya que se obtuvo el contenido de agua. Y se calcula por la siguiente expresión:

$$W_h = 200 ( 1 + W_2 )$$

En donde:  $W_h$  = peso de la muestra equivalente a 200 g. de material seco.

$W_2$  = contenido de agua del material que pasa por la malla Núm. 4.

- 7.- Se procede a cribar por las mallas antes mencionadas, se pesan los materiales retenidos en cada una de las mallas se registran los pesos y calculando el retenido parcial, porcentaje que pasa y el peso de la muestra real con la humedad que tenía los 200 g. con estos datos se grafica y se obtienen las conclusiones.

## COMPACTACION DINAMICA PROCTOR (30 golpes)

### COMPACTACION

Es la aplicación mecánica de cierta energía o cantidad de trabajo por unidad de volumen, para lograr una reducción de los espacios entre las partículas sólidas de un suelo, con el objeto de mejorar sus características mecánicas.

Si a un suelo cuya humedad es baja se le va dando ciertos incrementos a su contenido de agua y se le aplica cada vez la misma energía de compactación, su peso volumétrico va aumentando, propiciado por la acción lubricante del agua, hasta que llega un momento en que el peso volumétrico del material seco, calculado a partir — del peso volumétrico del material húmedo y de la humedad, alcanza un valor máximo. Al contenido de agua con el que se obtiene el mejor acomodo de las partículas y el mayor peso volumétrico, para una determinada energía de compactación, se le denomina humedad óptima y el peso volumétrico como peso específico o volumétrico seco máximo.

#### Equipo y materiales

- 1.- Equipo de compactación compuesto de molde, collarín, placa base metálica, pisón metálico y regla metálica de arista cortante.
- 2.- Balanza de 15 kg. de capacidad y 5 g. de aproximación.
- 3.- Balanza de 2 kg. de capacidad y 0.1 de aproximación.
- 4.- Horno con termostato.
- 5.- Base cúbica de concreto.
- 6.- Probeta de 500 cm<sup>3</sup> y de 1000 cm<sup>3</sup>.
- 7.- Malla del N.º 4.
- 8.- Cápsulas metálicas con tapa.
- 9.- Charolas rectangulares.
- 10.- Aceite para lubricar.
- 11.- Desarmador.

## P R O C E D I M I E N T O

- 1.- De la muestra preparada se pasa por la malla N<sup>o</sup>. 4, de este material se toma 4 kg. aproximadamente y se coloca en una charola.
- 2.- Se agrega una cierta humedad uniformemente repartida, esta humedad debe ser inferior a la óptima estimada se revuelve perfectamente con las manos.
- 3.- Se toman las dimensiones del molde como altura y diámetro para posteriormente sacar el volumen, se pesa el molde con la base y se registran estos datos. También se obtiene el peso del pisón.
- 4.- Se lubrica el molde proctor en sus paredes interiores.
- 5.- Una vez preparado todo, se procede a colocar una tercera parte de material en el molde proctor, colocando desde luego el collarín, se apoya sobre la base de concreto y se compacta con 30 golpes con el pisón de 2.5 kg. se repiten estas operaciones con las otras dos fracciones restantes.  
Con los datos de: peso del pisón, altura de caída, N<sup>o</sup>. de capas, N<sup>o</sup>. de golpes y volumen del molde se calcula la energía de compactación con la fórmula que se menciona al final de esta prueba.
- 6.- Terminada la compactación, se retira el collarín y se engrasa con la regla metálica del centro hacia el borde.
- 7.- Se pesa el molde con la placa base y su contenido y se registra este peso en gramos.
- 8.- Se extrae el espécimen del cilindro con un desarmador, de este material se obtiene una porción representativa colocándola en una cápsula, se pesa y se mete al horno para posteriormente determinar su humedad.
- 9.- El material que sobra se disgrega los grumos, y se le agrega 2% de agua aproximadamente con respecto al peso. Se repiten los pasos anteriores.

10.- Al pesar el molde en cada etapa, el peso se va incrementando - hasta llegar en el momento donde baja de peso. Se requiere que las determinaciones sean de 4 o 5 puntos; así también, que en la segunda determinación el peso del cilindro con el espécimen húmedo, sea mayor que en la primera, y que en la penúltima determinación sea mayor que en la última.

11.- Una vez transcurrido el tiempo necesario de secado de las muestras, se determinan sus contenidos de agua.

Los cálculos y reportes que se efectúan en esta prueba son los siguientes:

Se calcula el peso específico del material húmedo por la siguiente fórmula:

$$\rho_m = \frac{W_i - W_t}{V} \times 100$$

En donde:  $\rho_m$  = peso específico del material húmedo, en  $\text{kg/cm}^3$

$W_i$  = peso del material húmedo compactado más el peso del cilindro, en gramos.

$W_t$  = peso del cilindro, en gramos.

$V$  = volumen del cilindro, en  $\text{cm}^3$

Se calcula el peso específico de cada espécimen en estado seco, mediante la siguiente fórmula:

En donde:

$$\rho_{m\text{seco}} = \frac{\rho_m}{100 + W} \times 100$$

$\rho_{m\text{seco}}$  = peso específico del espécimen en estado seco, en  $\text{kg/cm}^3$

$W$  = contenido de agua, en por ciento.

Todos estos datos se anotan en la hoja de reporte y se grafica la curva proctor determinando el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima, el punto más alto de dicha curva representa los mencionados.

La energía de compactación se determina por la siguiente fórmula

$$E = \frac{W_p h n N}{V}$$

En donde:

$W_p$  = peso del pisón, en kilogramos.

$h$  = altura de caída del pisón, en centímetros.

$n$  = número de capas.

$N$  = número de golpes.

$V$  = volumen del molde, en centímetros cúbicos

### COMPACTACION ESTATICA

Para la determinación de la expansión se emplea el molde porter, reproduciendo diferentes pesos volumétricos, con los grados de compactación de 90, 95, 100 y 110, como también variando las humedades uno en el óptimo, un punto mas 1.5 % y otro al 1.5 % menos del óptimo.

#### Equipo y materiales

- 1.- Máquina de compresión.
- 2.- Molde porter cilíndrico, collarín y una base con dispositivo para sujetar el cilindro.
- 3.- Tanque de saturación con altura mínima de 30 cm.
- 4.- Placa metálica circular de 15.4 cm, de diámetro con perforaciones y un vástago al centro para apoyar el extensómetro.
- 5.- Dos placas circulares de carga con diámetro de 15.4cm, teniendo un orificio central de 5.4 cm. de diámetro y un peso de 3 kg — cada una.
- 6.- Extensómetro con carrera de 2.54 cm y aproximación de 0.01 milímetro. Con una abrazadera para acoplarlo al cilindro de penetración.
- 7.- Hoja de papel filtro con diámetro de 15.4 cm.
- 8.- Trípode metálico para sostener el extensómetro.
- 9.- Malla Núm. 4.75.

#### PROCEDIMIENTO

- 1.- De la muestra preparada que pasa la malla Núm. 4.75, se le determina su contenido de agua.
- 2.- A continuación se pesa la porción de la muestra y se anota su peso  $W_m$ , en gramos y se agrega la cantidad de agua necesaria para que alcance la humedad de prueba de compactación, la ---

cual se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$A = W_m \frac{W_2 - W_1}{100 + W_1}$$

En donde:

A = es el volumen de agua por agregar, en  $\text{cm}^3$

$W_m$  = es el peso de la muestra con su humedad inicial, en grs.

$W_2$  = es la humedad de prueba, en por ciento.

$W_1$  = es la humedad inicial del material, en por ciento

- 3.- Inmediatamente después se mezcla convenientemente el material y se pesa la muestra de prueba que se requiere para llenar el molde sin la extensión, determinando dicha cantidad para el grado de compactación que se desea, con la siguiente fórmula:

$$P_w = \frac{C}{100} \times \frac{V_d}{1000} \times \frac{100 + W_2}{100} \times V$$

En donde:

$P_w$  = es el peso de la muestra de prueba en estado húmedo, en kg.

C = es el grado de compactación con que se va a elaborar el espécimen, en por ciento.

$V_d$  = es el peso específico seco máximo del material, en  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

V = es el volumen del cilindro de prueba sin collarín, en decímetros cúbicos.

- 4.- Se coloca la muestra en tres capas, dentro del molde con el collarín instalado acomodando cada capa con 25 golpes de la varilla metálica.
- 5.- Se instala el molde en la máquina de compresión y se compacta la muestra en forma lenta y uniforme, una vez que halla alcanzado la altura deseada se retira.
- 6.- Se coloca el papel filtro, posteriormente la placa perforada con el vástago y con las dos placas de carga, así también instalando el trípode con el extensómetro.

7.- Se toma la lectura inicial y se procede a saturar la muestra, tomando lecturas cada 24 hrs. suspendiendo en donde dos lecturas sucesivas se parezcan, calculando el porcentaje de expansión por la siguiente fórmula:

$$E = \frac{L_f - L_i}{h_e} \times 100$$

En donde:

- E = es la expansión de la muestra, en por ciento.
- L<sub>f</sub> = es la lectura del extensómetro al finalizar la saturación, en milímetros.
- L<sub>i</sub> = es la lectura del extensómetro al iniciarse la saturación, en milímetros.
- h<sub>e</sub> = es la altura inicial del espécimen, en milímetros.

## PERMEABILIDAD

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad se hará de la misma manera de diferentes grados de compactación y humedad como en la prueba de expansión y también por compactación estática, a sólo que aquí se usarán los moldes metálicos especiales para la permeabilidad.

## P R O C E D I M I E N T O

- 1.- Se fija el grado de compactación y humedad en la que se realizará la prueba.
- 2.- De la muestra preparada que pasa por la malla Num. 4, se toma una porción representativa y se le determina su humedad.
- 3.- Se calcula el volumen del molde que va a estar sometida la muestra en estudio.
- 4.- Conociendo el volumen y la humedad del material, se calcula la cantidad de material que se va a emplear y la humedad que se requiere para su estudio. Calculando por las fórmulas vistas en el párrafo anterior.
- 5.- Se pesa la cantidad de material calculada y se deposita en una charola.
- 6.- Se le agrega agua a la cantidad calculada uniformemente en toda la superficie y se homogeneiza.
- 7.- Se vuelve a pesar el material, quitando el que sobra dejando únicamente el que se requiere para ese grado de compactación.
- 8.- Una vez logrado lo anterior se coloca una placa plana y los dos moldes encima, depositando el material en tres capas la primera capa se le da 25 golpes, y de la misma manera las otras dos restantes.
- 9.- Se lleva a la prensa de compresión, se compacta hasta llegar a la marca fijada en el escantillón.
- 10.- Terminando lo anterior, se verifica que el material halla llegado al borde superior del molde.

11.- Se procede a llevar en el permeámetro, colocandola de la siguiente forma:

Se colocan los sellos de hule, tela permeable, el molde que contiene la muestra, la tela permeable, la placa porosa, sellos de hule, resorte calibrado, el segundo molde, sellos de hule y por último tapa acrílico y se atornilla.

12.- Se llena de presión el tanque y se inyecta agua a la muestra, como se muestra en la figura II.8 del capítulo II, dejando saturar durante 24 hrs. por lo menos. Al siguiente día se toman las lecturas a diferentes presiones.

Se calcula la permeabilidad de ese suelo con la siguiente expresión.

$$K = \frac{L a}{\Delta t A} \text{ Log. } \frac{h_1}{h_2} \quad \text{En donde:}$$

L = espesor de la muestra.

a = area de la bureta.

$\Delta t$  = tiempo que tarda de  $h_1$  a  $h_2$

A = área de la muestra.

$h_1$  = carga inicial.

$h_2$  = carga final.

Nota: En la realización de todas las pruebas mencionadas, se realizarán varias veces y se sacarán promedios.

**C A P I T U L O V****REALIZACION DE LAS PRUEBAS, REGISTRO E INTERPRETACION  
DE LOS DATOS.****NOTA:**

Para la realización de las pruebas índice y mecánicas, se siguieron los procedimientos que se enuncian en la planeación de la investigación (capítulo anterior).

**V.1 REGISTRO E INTERPRETACION DE LOS DATOS.**

Se registran los resultados de las pruebas: Límites de A — tterberg o de consistencia, Granulometría, Compactación — proctor (30 golpes), Expansión y Permeabilidad.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ARAGON"

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

LIMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG

MATERIAL ARCILLA GASE CLARA TRABAJO TESIS

LOCALIZACION JILOTEPEC OPERADOR ANGEL C. M.

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO (LL)

PRUEBA N°	CAPSULA		PESO CAR	PESO CAR	PESO	PESO	CONTENIDO DE AGUA %	NUMERO DE GOLPES #
	N°	PESO	S. HUMEDO	S. SECO	AGUA	SUELO SECO		
1	14	8.22	25.13	18.95	6.18	10.73	57.50	40
2	20	8.50	23.17	17.66	5.51	9.16	60.15	30
3	22	7.81	25.44	18.42	7.02	10.61	66.16	20
4	12	6.70	23.71	15.57	6.14	8.87	69.22	14

DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO (LP)

1	31	7.35	9.23	8.79	0.44	1.44	30.55
2	44	8.20	10.11	9.68	0.43	1.48	29.05

Límite líquido, LL = 62.5 %

Límite plástico, LP = 29.8 %

Índice de plasticidad, Ip = 32.7 %

CONTRACCION LINEAL

Lectura inicial, Li = 9.88 cm.

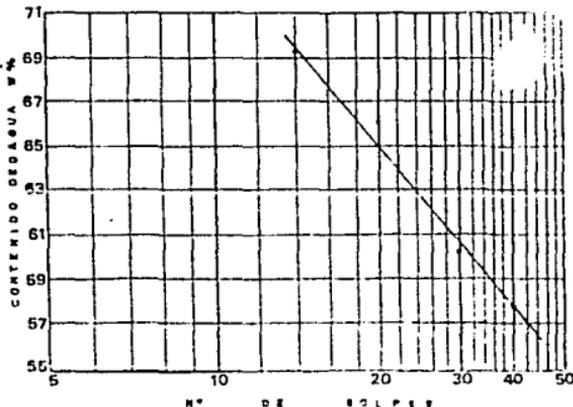
Lectura final, Lf = 8.40 cm.

C.L. =  $\frac{Li - Lf}{Li} \times 100$

C.L. =  $\frac{9.88 - 8.40}{9.88} \times 100$

C.L. = 14.98 %

CLASIFICACION: S.U.C.S. CH





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ARAGON"

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

LIMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG

MATERIAL ARCILLA CAPE OSCURA TRABAJO TESIS

LOCALIZACION JILOTEPEC OPERADOR ANGEL G. M.

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO (LL)

PRUEBA N°	CAPSULA		PESO CAP. + S. HUMEDO	PESO CAP. + S. SECO	PESO AGUA	PESO SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA W%	NUMERO DE GOLPES
	N°	PESO						
1	15	7.92	26.15	20.56	5.59	12.64	44.22	42
2	32	8.40	24.62	19.53	5.09	11.13	45.73	32
3	18	7.33	28.33	21.58	6.75	14.25	47.37	17
4	24	8.23	25.17	19.60	5.57	11.37	48.98	10

DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO (LP)

1	52	7.52	9.42	9.01	0.41	1.49	27.52
2	31	7.35	10.68	9.97	0.71	2.62	27.09

Límite líquido, LL = 46.25 %

Límite plástico, LP = 27.30 %

Índice de plasticidad, Ip = 18.95

CONTRACCION LINEAL

Lectura inicial, Li = 9.99 cm.

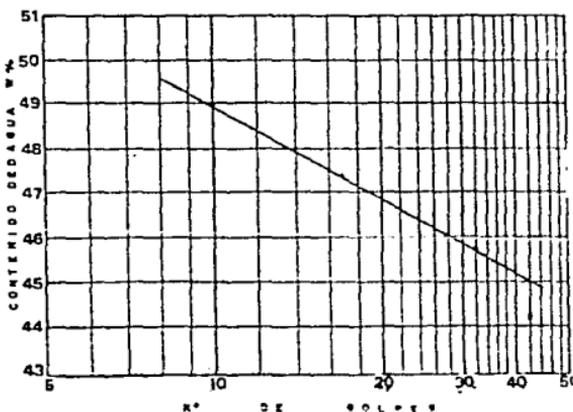
Lectura final, Lf = 8.88 cm.

C.L. =  $\frac{Li - Lf}{Li} \times 100$

C.L. =  $\frac{9.99 - 8.88}{9.99} \times 100$

C.L. = 11.11 %

CLASIFICACION S.U.C.S. OL





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA II  
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ARAGON"

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

LIMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG

MATERIAL ARCILLA GRIS TRABAJO TESIS  
LOCALIZACION CUAUTEPREC OPERADOR ANGEL G. M.

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO (LL)

PRUEBA N°	CAPSULA		PESO CAP. + S. HUMEDO	PESO CAP. + S. SECO	PESO AGUA	PESO SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA % W	NUMERO DE GOLPES N
	R°	PESO						
1	18	7.33	27.21	20.89	6.32	13.56	46.61	40
2	12	6.70	26.34	19.90	5.44	13.20	48.78	31
3	15	7.92	29.14	22.05	7.08	14.14	50.07	21
4	24	8.23	28.04	21.19	6.85	12.96	52.86	15

DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO (LP)

1	40	7.85	10.05	9.60	0.45	1.75	25.71
2	67	8.48	9.35	9.17	0.18	0.69	25.08

Límite líquido, LL= 49.20 %

Límite plástico, LP= 25.89 %

Índice de plasticidad, Ip= 23.31 %

CONTRACCION LINEAL

Lectura inicial, Li= 10.0 cm

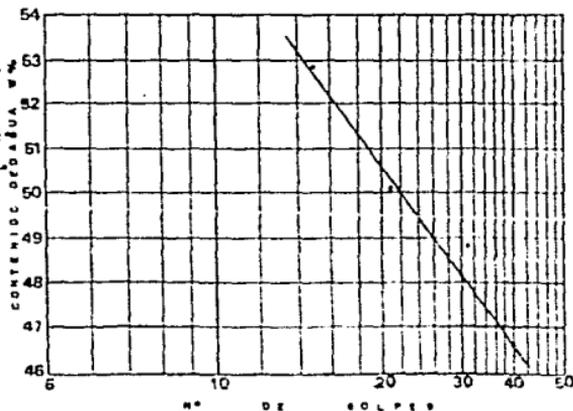
Lectura final, Lf= 8.98 cm

$$C.L. = \frac{Li - Lf}{Li} \times 100$$

$$C.L. = \frac{10.0 - 8.98}{10.0} \times 100$$

$$C.L. = \underline{10.2 \%}$$

CLASIFICACION S.U.C.S. CL



## COMPOSICION GRANULOMETRICA DEL MATERIAL QUE PASA LA MALLA NUM. 4

Arcilla café clara

Malla Num.	Peso retenido g	Retenido parcial%	Mat. que pasa %
10	0		
20	0.17	0.09	99.90
40	1.70	0.96	98.94
60	0.75	0.42	98.52
100	2.41	1.37	97.15
200	4.67	2.65	94.50
Pasa a la 200	166.51	94.5	
SUMA	176.21	100	

Material empleado 200 g

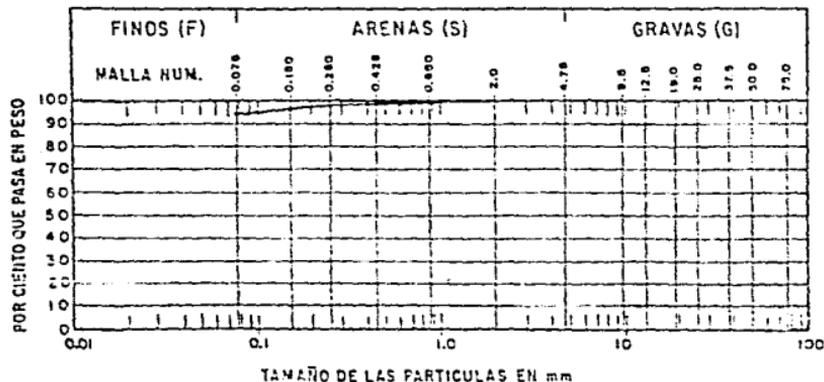
Humedad del material

W = 13.5 %

Corrección por humedad

$$C = \frac{200}{1+0.135} = 176.21 \text{ g}$$

GRAFICA DE COMPOSICION GRANULOMETRICA



Límite líquido 61.46 %

Límite plástico 30.23 %

Índice plástico 31.23 %

Clasificación SUCS y descripción del material CH Arcilla de alta plasticidad

## COMPOSICION GRANULOMETRICA DEL MATERIAL QUE PASA LA MALLA NUM. 4

Arcilla café oscura

Malla Num.	Peso retenido g	Retenido parcial%	Mat. que pasa %
10	0.88	0.50	99.50
20	1.69	0.97	98.53
40	7.44	4.26	94.27
60	2.86	1.64	92.63
100	7.48	4.28	88.35
200	13.22	7.57	80.78
Pasa a la 200	141.06	80.78	
SUMA	174.63	100	

Material empleado 200 g

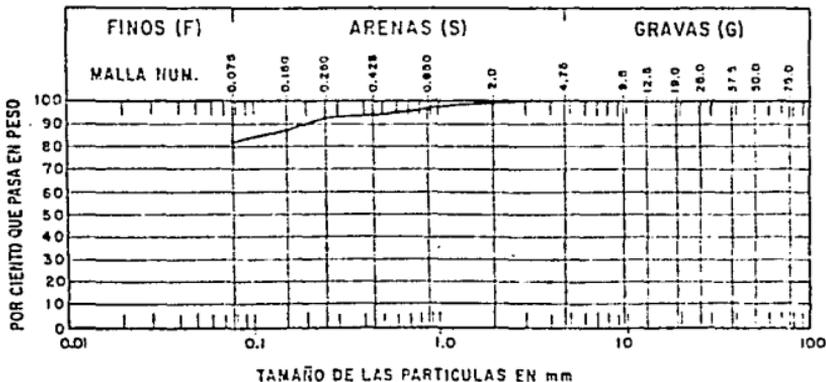
Humedad del material

 $W = 14.53 \%$ 

Corrección por humedad

$$C = \frac{200}{1+0.1453} = 174.63 \text{ g}$$

GRAFICA DE COMPOSICION GRANULOMETRICA



Límite líquido 46.02 %

Límite plástico 27.89 %

Índice plástico 18.13 %

Clasificación SUCS y descripción del material OL Arcilla orgánica de baja plasticidad

## COMPOSICION GRANULOMETRICA DEL MATERIAL QUE PASA LA MALLA NUM. 4

## Arcilla gris

Malla Num.	Peso retenido g	Retenido parcial %	Mat. que pasa %
10	11.8	6.45	93.55
20	11.8	6.45	87.10
40	19.9	10.87	76.23
60	5.10	2.79	73.44
100	11.7	6.39	67.05
200	21.5	11.75	55.30
Pasa a la 200	101.19	55.30	
SUMA	182.99	100	

Material empleado 200 g

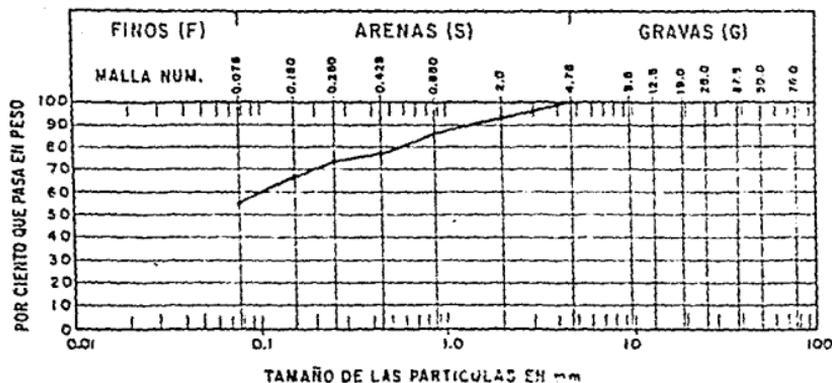
Humedad del material

W = 9.29 %

Corrección por humedad

$$C = \frac{200}{1+0.0929} = 182.99 \text{ g}$$

## GRAFICA DE COMPOSICION GRANULOMETRICA



Límite líquido 49.38 %

Límite plástico 25.89 %

Índice plástico 23.49 %

Clasificación SUCS y descripción del material CL Arcilla arenosa

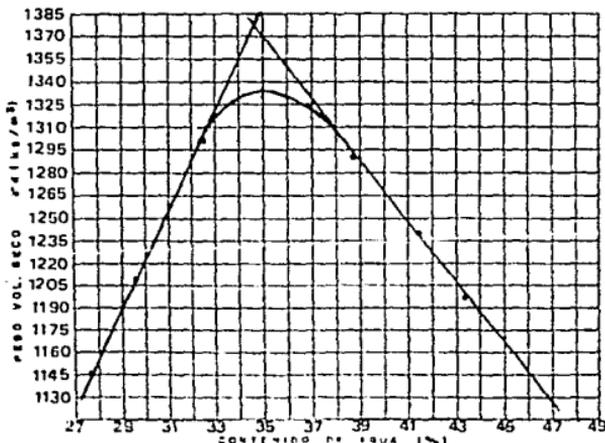
## ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ARAGON"

## LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

## C O M P A C T A C I O N

MATERIAL ARCILLA CAFE CLARA TRABAJO TESISLOCALIZACION JILOTEPEC OPERADOR ANGEL C. M.TIPO DE PRUEBA PROCTOR 30 GOLPESMOLDE N. UNO VOLUMEN 942.96 cc. PESO 3340 gr.PESO MARTILLO 2500 gr. ALTURA DE CAIDA 30.5 cm.ENERGIA DE COMPACTACION 7.28 kg.cm/cc.NUMERO DE CAPAS TRES NUMERO GOLPES POR CAPA 30

PRUEBA N°	1	2	3	4	5	6
PESO MOLDE + SUELO HUMEDO	4720	4820	4965	5030	4990	4960
PESO MOLDE (GR)	3340	3340	3340	3340	3340	3340
PESO SUELO HUMEDO (GR)	1380	1480	1625	1690	1650	1620
PESO VOL. HUMEDO, $\gamma_h$ (kg/m <sup>3</sup> )	1463.47	1569.52	1723.29	1792.23	1749.81	1717.99
CAPSULA N°	94	31	81	55	89	69
PESO CAPSULA (GR)	7.54	7.44	7.96	7.25	7.66	6.83
PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	34.37	26.51	25.58	36.87	36.08	36.58
PESO CAPSULA + SUELO SECO	28.54	22.14	21.28	28.57	22.78	21.60
PESO DEL AGUA (GR)	5.83	4.37	4.30	8.30	8.30	8.98
PESO SUELO SECO (GR)	21.0	19.7	13.32	21.32	20.12	20.77
CONTENIDO DE AGUA, W %	27.76	29.73	32.28	38.93	41.25	43.23
PESO VOL. SECO, $\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1145.48	1209.83	1302.76	1290.02	1238.80	1199.46
RELACION DE VACIOS, (e)						



$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

$$\gamma_d \text{ máximo } 1334 \text{ kg/m}^3$$

$$w \text{ óptima } 35 \%$$

## ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ARAGON"

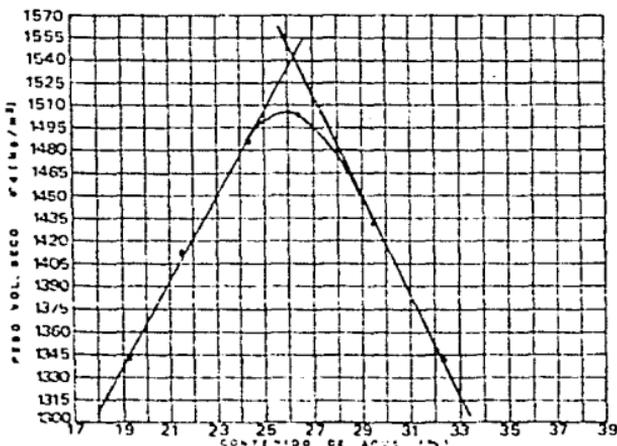
## LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

## COMPACTACION

MATERIAL ARCILLA GARE OSCURA TRABAJO TESISLOCALIZACION JILOTEPEC OPERADOR ANGEL C. M.

TIPO DE PRUEBA PROCTOR 30 GOLPES  
 MOLDE N. UNO VOLUMEN 942.06 cc. PESO 3340 gr.  
 PESO MARTILLO 2500 gr. ALTURA DE CAIDA 30.5 cm  
 ENERGIA DE COMPACTACION 7.28 kg cm/cc  
 NUMERO DE CAPAS TRES NUMERO GOLPES POR CAPA 30

PRUEBA N.	1	2	3	4	5	6
PESO MOLDE + SUELO HUMEDO	4850	4960	5080	5130	5090	5013
PESO MOLDE (BR)	3340	3340	3340	3340	3340	3340
PESO SUELO HUMEDO (BR)	1510	1620	1740	1790	1750	1673
PESO VOL. HUMEDO, $\gamma_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1601.34	1717.99	1845.25	1898.27	1855.85	1774.20
CAPSULA N.	4	9	11	34	6	96
PESO CAPSULA (BR)	7.80	8.02	7.73	7.32	8.07	7.64
PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	28.07	29.47	33.69	29.50	44.74	40.90
PESO CAPSULA + SUELO SECO	24.20	25.68	29.54	24.27	36.33	32.82
PESO DEL AGUA (BR)	3.27	3.81	5.06	4.63	8.36	8.10
PESO SUELO SECO (BR)	17	17.64	20.81	17.55	28.31	25.16
CONTENIDO DE AGUA, W %	19.23	21.59	24.31	26.38	29.53	32.19
PESO VOL. SECO, $\gamma_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	1343.06	1412.94	1484.39	1502.03	1432.76	1342.16
RELACION DE VACIOS, (e)						



$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{W}{100}}$$

$\gamma_d$  máxima 1505 kg/m<sup>3</sup>

W óptima 26 %



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ARAGON"

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

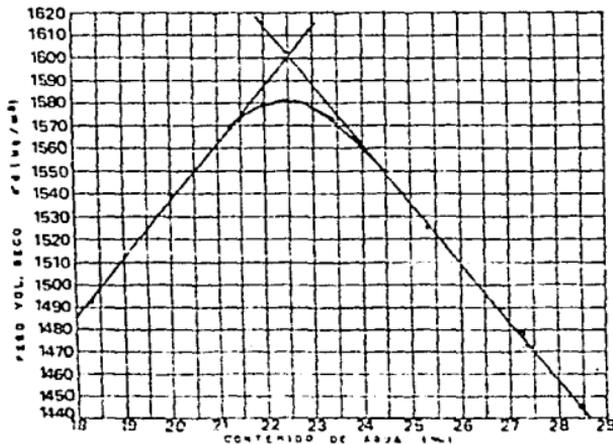
COMPACTACION

MATERIAL ARCILLA GRIS TRABAJO TESIS

LOCALIZACION CUATEPEC OPERADOR ANGEL G. M.

TIPO DE PRUEBA PROCTOR 30 GOLPES  
 MOLDE N. UNO VOLUMEN 942.95 cc. PESO 3340 gr.  
 PESO MARTILLO 2500 gr. ALTURA DE CAIDA 30.5 cm  
 ENERGIA DE COMPACTACION 7.26 kg cm/cc  
 NUMERO DE CAPAS TRES NUMERO GOLPES POR CAPA 30

PRUEBA N.	1	2	3	4	5	6
PESO MOLDE + SUELO HUMEDO	5005.2	5135.5	5170.0	5143.8	5113.8	5090.7
PESO MOLDE (GR)	3340	3340	3340	3340	3340	3340
PESO SUELO HUMEDO (GR)	1665.2	1795.5	1830	1803.8	1773.8	1750.7
PESO VOL. HUMEDO, $\gamma_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	1765.9	1904.11	1940.69	1912.01	1881.1	1856.6
CAPSULA N.	84	31	38	30	76	55
PESO CAPSULA (GR)	7.54	7.44	7.61	7.89	7.97	7.25
PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO	38.06	32.52	37.21	31.29	32.11	42.63
PESO CAPSULA + SUELO SECO	33.33	32.23	31.60	26.55	26.95	34.73
PESO DEL AGUA (GR)	4.73	5.29	5.61	4.74	5.16	7.84
PESO SUELO SECO (GR)	25.79	24.73	23.99	18.66	18.98	27.54
CONTENIDO DE AGUA, W %	18.34	21.34	23.38	25.40	27.18	28.46
PESO VOL. SECO, $\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1492.25	1569.23	1572.94	1525.45	1479.08	1445.27
RELACION DE VACIOS, (e)						



$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

$\gamma_d$  máximo 1581 kg/m<sup>3</sup>  
 W óptimo 22.6 %

## PRUEBA DE EXPANSION

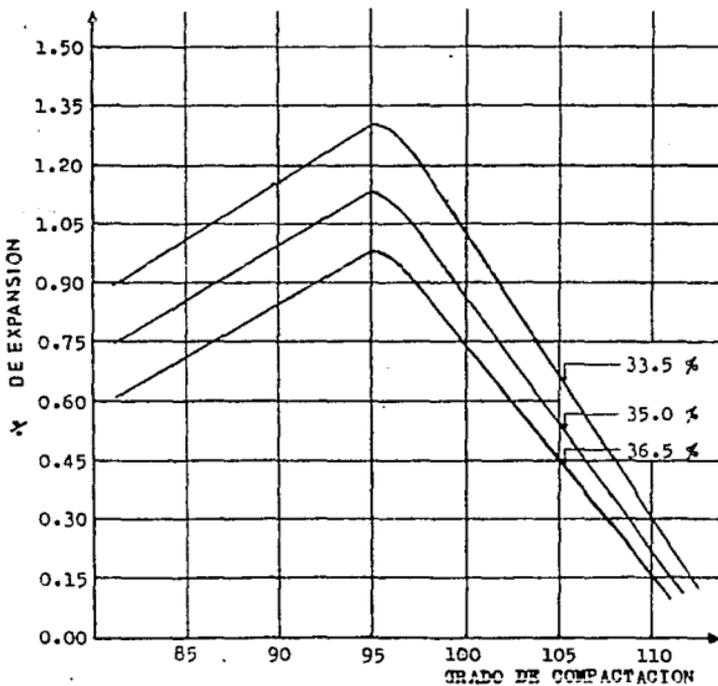
## DATOS INICIALES

Diámetro de la muestra 15.70 cm.      Altura de la muestra 12.65 cm.  
 Área de la muestra 193.59 cm<sup>2</sup>      Volumen de la muestra 2448.95 cm<sup>3</sup>

GRADO DE COMPACTACION	PESO ESPECIFICO SECO		HUMEDAD DE PRUEBA	AGUA POR ABEERAR		PESO DEL MATERIA HUMEDO	PEÑO DEL EQUIPO MAS MATERIAL		HUMEDAD DEL MAT.
	C M	$\frac{P_d - C}{100}$		$\frac{P_m}{M}$	$\frac{A - W_m}{100}$		$\frac{W - W_m}{100}$	A + P <sub>2</sub>	
ARCILLA CAPE CLARA									
90		1200.6	13.5		691.25	1325.18		6174.17	13.51
90		1200.6	35.0		751.50	1969.28		6417.90	13.51
90		1200.6	36.5		812.85	4013.38		6461.90	13.51
95		1267.3	33.5		673.20	4143.24		6592.10	14.84
95		1267.3	35.0		793.20	4389.79		6638.70	13.51
95		1267.3	36.5		799	4236.35		6685	14.84
100		1334	33.5		708.65	4361.31		6809.90	14.84
100		1334	35.0		774.22	4410.31		6858.90	14.84
100		1334	36.5		1165.80	4459.32		6908.20	8.21
110		1467.4	33.5		1121.20	4797.40		7246.30	8.21
110		1467.4	35.0		544.81	4551.34		7300.30	21.37
110		1467.4	36.5		855.45	4325.25		7353.85	16.23
ARCILLA CAPE OSCURA									
90		1354.5	24.5		661.55	4129.80		6578.70	7.31
90		1354.5	26.0		727.90	4179.55		6628.60	7.31
90		1354.5	27.5		795.73	4229.30		6678.20	7.31
95		1429.75	24.5		739.16	4359.20		6808.10	6.45
95		1429.75	26.0		810.24	4411.75		6859.90	6.45
95		1429.75	27.5		882.80	4464.80		6913.70	6.45
100		1505	24.5		778	4538.66		7037.50	6.45
100		1505	26.0		743.06	4643.94		7092.85	8.62
100		1505	27.5		816.80	4693.23		7147.90	8.62
110		1651.5	24.5		737.90	5047.50		7495.90	8.62
110		1655.5	26.0		817.40	5108.30		7556.90	8.62
110		1655.5	27.5		722.70	5169.10		7618.00	13.86
ARCILLA GRIS									
90		1422.9	21.1		604.20	4219.86		6568.70	5.92
90		1422.9	22.6		672.80	4272.13		6720.90	5.92
90		1422.9	24.1		742.20	4324.40		6772.90	5.92
95		1501.95	21.1		638.40	4454.30		6902.90	5.92
95		1501.95	22.6		697.80	4509.50		6967.90	5.92
95		1501.95	24.1		770.87	4564.65		7013.60	6.17
100		1581	21.1		659.35	4628.74		7137.70	6.17
100		1581	22.6		734.60	4748.81		7195.70	6.17
100		1581	24.1		915.40	4804.90		7253.80	4.24
110		1739.1	21.1		834.20	5157.60		7606.55	4.24
110		1739.1	22.6		919.70	5221.50		7670.40	4.24
110		1739.1	24.1		466.75	5285.38		7734.30	14.07

RESULTADOS OBTENIDOS DEL PORCENTAJE DE EXPANSION  
 ARCILLA CAFE CLARA DE JILOTEPEC CON CARGA

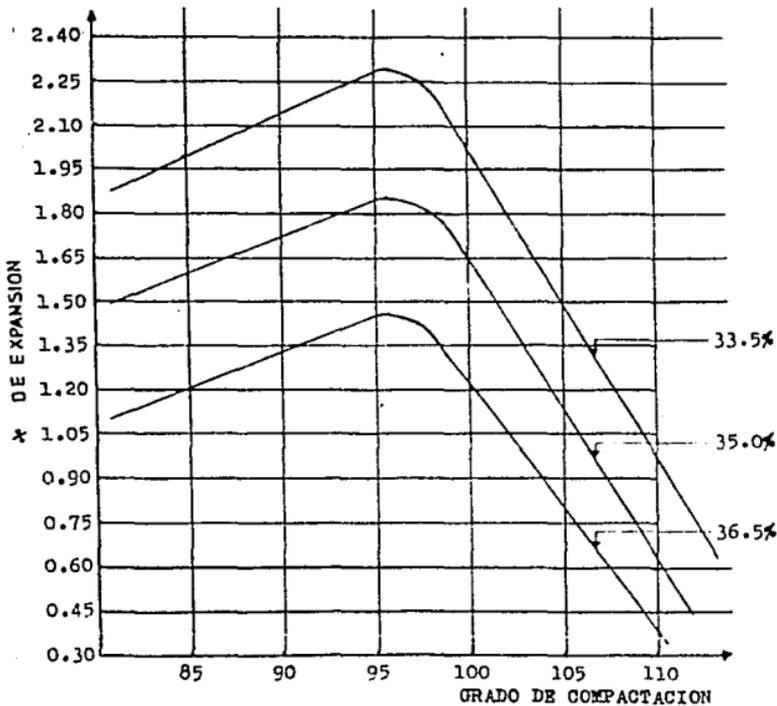
W %	GRADO DE COMPACTACION			
	90%	95%	100%	110%
33.5	1.15	1.29	1.03	0.30
35.0	0.99	1.13	0.86	0.22
36.5	0.84	0.98	0.74	0.16



Expansión a 72 hrs.

RESULTADOS OBTENIDOS DEL PORCENTAJE DE EXPANSION  
 ARCILLA CAFE CLARA DE JILOTEPEC SIN CARGA

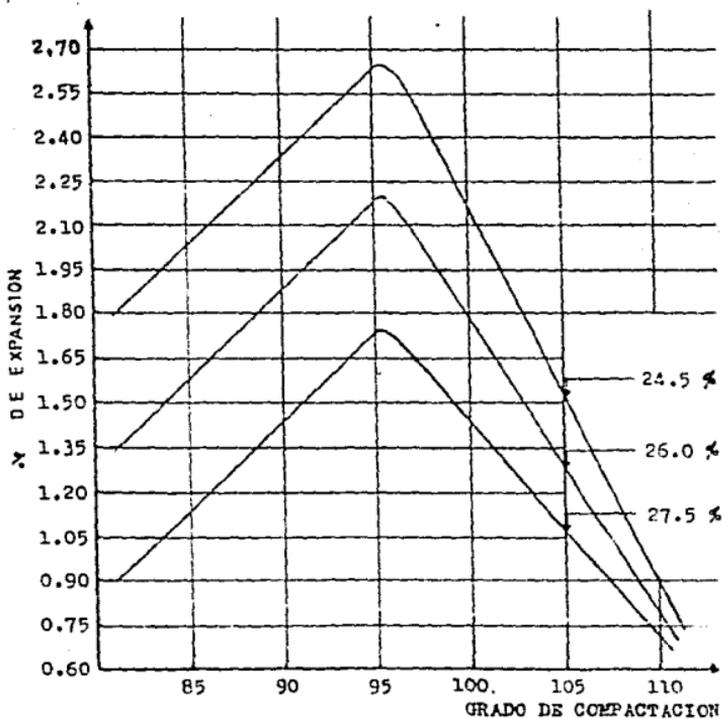
W %	GRADO DE COMPACTACION			
	90 %	95 %	100 %	110 %
33.5	2.13	2.27	2.01	0.96
35.0	1.72	1.84	1.65	0.62
36.5	1.33	1.45	1.22	0.39



Expansión a 72 hrs.

RESULTADOS OBTENIDOS DEL PORCENTAJE DE EXPANSION  
 ARCILLA CAPE OSCURA DE JILOTEPEC CON CARGA

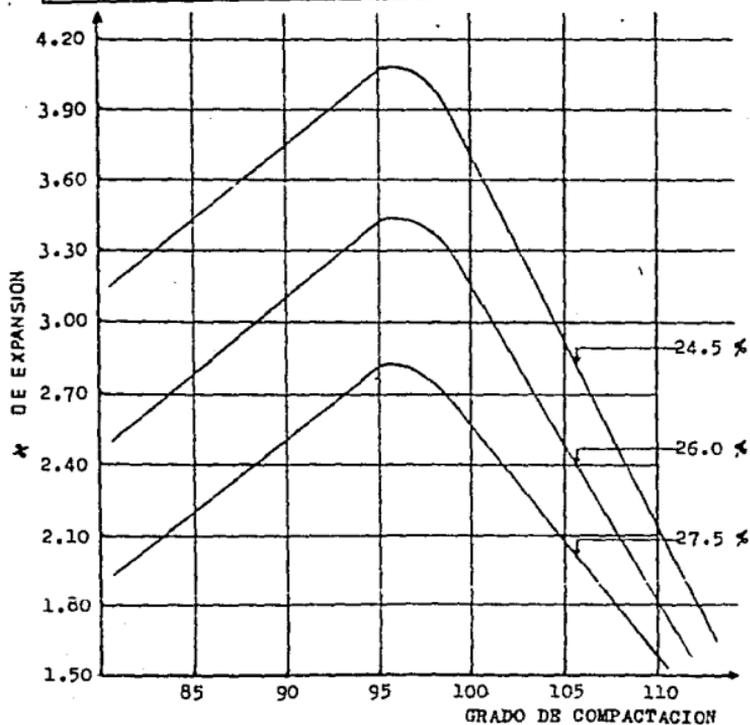
W %	GRADO DE COMPACTACION			
	90 %	95 %	100 %	110 %
24.5	2.33	2.63	2.14	0.89
26.0	1.88	2.17	1.78	0.79
27.5	1.43	1.72	1.43	0.71



Expansión a 72 hrs.

RESULTADOS OBTENIDOS DEL PORCENTAJE DE EXPANSION  
 ARCILLA CAPE OSCURA DE JILOTEPEC SIN CARGA

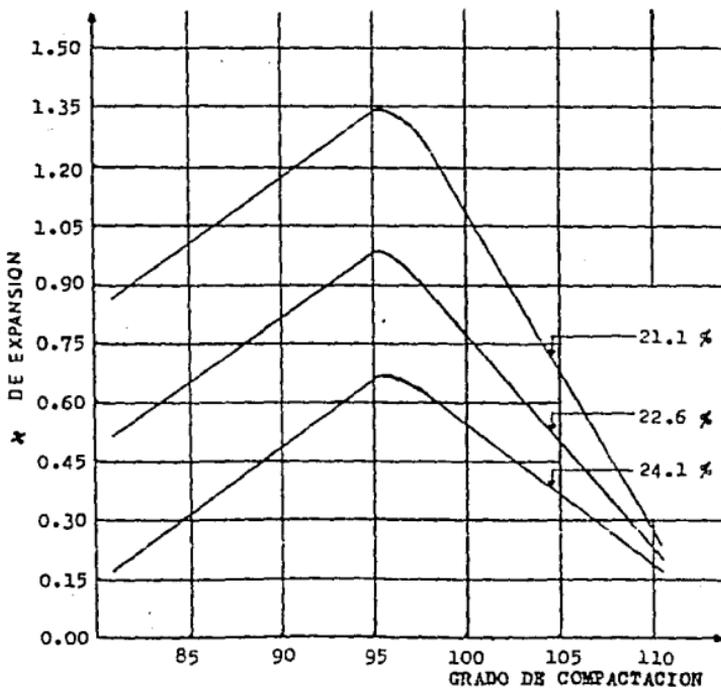
W %	GRADO DE COMPACTACION			
	90 %	95 %	100 %	110 %
24.5	3.74	4.07	3.70	2.14
26.0	3.11	3.41	2.14	1.81
27.5	2.50	2.81	2.57	1.60



Expansión a 72 hrs.

RESULTADOS OBTENIDOS DEL PORCENTAJE DE EXPANSION  
ARCILLA GRIS DE CUATEPEC CON CARGA

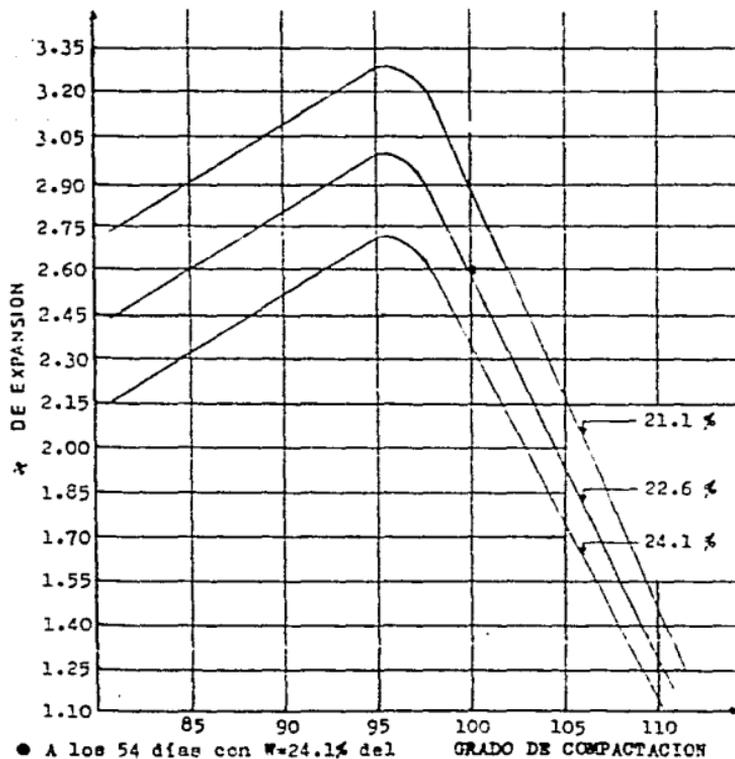
W %	GRADO DE COMPACTACION			
	90 %	95 %	100 %	110 %
21.1	1.17	1.33	1.07	0.27
22.6	0.82	0.98	0.77	0.22
24.1	0.49	0.65	0.55	0.18



Expansión a 72 hrs.

RESULTADOS OBTENIDOS DEL PORCENTAJE DE EXPANSION  
ARCILLA GRIS DE CUAUTEPEC SIN CARGA

W %	GRADO DE COMPACTACION			
	90 %	95 %	100 %	110 %
21.1	3.08	3.27	2.89	1.47
22.6	2.79	2.98	2.58	1.28
24.1	2.51	2.70	2.35	1.14



● A los 54 días con W=24.1% del 100% de compactación.

Expansión a 72 hrs.

## PERMEABILIDAD DE CARGA VARIABLE

## DATOS INICIALES

Diámetro de la muestra 15.20 cm. Longitud de la muestra 5.81 cm.  
 Área de la muestra 181.45 cm<sup>2</sup> Volumen de la muestra 1054.22 cm<sup>3</sup>  
 Diámetro de la bureta 0.683 cm. Área de la bureta 0.366 cm<sup>2</sup>

$$K=2.3 \frac{B L}{A \Delta A} \text{Log. } \frac{h_1}{h_2}$$

GRADO DE COMPACTACION	PESO ESPECIFICO SECO	HUMEDAD DE PRUEBA	AGUA POR AGREGAR	PESO DEL MATERIA HUMEDO	PESO DEL EQUIPO MAS MATERIAL	HUMEDAD DEL MAT.
C %	$\rho_d = \frac{G}{100} \frac{W_m}{W_s} \frac{g}{cm^3}$	$W_2 \%$	$A_w = W \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2} \text{ cm}^3$	$P_w = \frac{W}{1000} \frac{1000 - W_1}{100}$	$P_1 + P_2 \quad f$	$W_2 \%$
ARCILLA CAFE CLARA						
90	1200.6	33.5	271.83	1889.78	5257	15.00
90	1200.6	35.0	297.17	1708.77	5275	15.00
90	1200.6	36.5	301.31	1727.76	5295	16.23
95	1267.3	33.5	136.65	1783.66	5350	24.00
95	1267.3	35.0	187.95	1803.70	5371	22.00
95	1267.3	36.5	179.16	1823.74	5390	24.00
100	1334	33.5	3.52	1877.54	5444	31.25
100	1334	35.0	377.50	1898.63	5465	12.51
100	1334	36.5	46.82	1919.73	5486	33.25
ARCILLA CAFE OSCURA						
90	1354.5	24.5	149.35	1777.87	5344	15.33
90	1354.5	26.0	135.10	1799.29	5366	17.30
90	1354.5	27.5	254.26	1820.71	5386	11.35
95	1429.75	24.5	173.57	1876.64	5443	13.35
95	1429.75	26.0	142.06	1899.25	5465	17.00
95	1429.75	27.5	62.78	1921.86	5488	23.25
100	1505	24.5	40.49	1875.41	5542	22.00
100	1505	26.0	50.89	1999.23	5566	21.10
100	1505	27.5	119.14	2023.01	5588	19.35
ARCILLA GRIS						
90	1422.9	21.1	187.32	1816.65	5353	9.75
90	1422.9	22.6	270.50	1830.15	5405	9.50
90	1422.9	24.1	293.30	1851.65	5428	7.21
95	1501.95	21.1	263.30	1827.60	5434	6.45
95	1501.95	22.6	240.80	1841.33	5467	8.07
95	1501.95	24.1	361.90	1865.10	5491	4.71
100	1581	21.1	212.20	2035.50	5555	9.50
100	1581	22.6	288.77	2043.50	5569	7.42
100	1581	24.1	70.67	2062.43	5615	20.00

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PERMEABILIDAD ARCILLA CAPE CLARA  
GRADO DE COMPACTACION 90 %

PRUEBA NUM.	H U M E D A D		
	33.5 %	35.0 %	36.5 %
1	$4.8124 \times 10^{-4}$	$3.5589 \times 10^{-4}$	$1.8324 \times 10^{-4}$
2	$4.8397 \times 10^{-4}$	$2.4198 \times 10^{-4}$	$1.6132 \times 10^{-4}$
Kprom.	$4.8260 \times 10^{-4}$	$2.9893 \times 10^{-4}$	$1.7228 \times 10^{-4}$

GRADO DE COMPACTACION 95 %

PRUEBA NUM.	H U M E D A D		
	33.5 %	35.0 %	36.5 %
1	$8.1587 \times 10^{-5}$	$3.4782 \times 10^{-5}$	$1.6200 \times 10^{-5}$
2	$6.6138 \times 10^{-5}$	$2.4915 \times 10^{-5}$	$2.0725 \times 10^{-5}$
3	$6.2138 \times 10^{-5}$	$3.0690 \times 10^{-5}$	0.0
Kprom.	$6.8 \times 10^{-5}$	$3.0129 \times 10^{-5}$	$1.8462 \times 10^{-5}$

GRADO DE COMPACTACION 100 %

PRUEBA NUM.	H U M E D A D		
	33.5 %	35.0 %	36.5 %
1	$6.0919 \times 10^{-6}$	$2.5585 \times 10^{-6}$	$1.5805 \times 10^{-6}$
2	$7.8078 \times 10^{-6}$	$2.2938 \times 10^{-6}$	$1.3079 \times 10^{-6}$
3	0.0	$2.0014 \times 10^{-6}$	$7.7945 \times 10^{-7}$
Kprom.	$6.9498 \times 10^{-6}$	$2.2846 \times 10^{-6}$	$1.2226 \times 10^{-6}$

## RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PERMEABILIDAD ARCILLA CAPE OSCURA

## GRADO DE COMPACTACION 90 %

PRUEBA NUM.	H U M E D A D		
	24.5 %	26.0 %	27.5 %
1	$3.7188 \times 10^{-4}$	$2.3768 \times 10^{-4}$	$1.3168 \times 10^{-4}$
2	$3.4467 \times 10^{-4}$	$2.0642 \times 10^{-4}$	$1.1795 \times 10^{-4}$
Kprom.	$3.5827 \times 10^{-4}$	$2.2205 \times 10^{-4}$	$1.2481 \times 10^{-4}$

## GRADO DE COMPACTACION 95 %

PRUEBA NUM.	H U M E D A D		
	24.5 %	26.0 %	27.5 %
1	$5.2974 \times 10^{-5}$	$2.4312 \times 10^{-5}$	$1.3993 \times 10^{-5}$
2	$4.6898 \times 10^{-5}$	$2.6487 \times 10^{-5}$	$1.1534 \times 10^{-5}$
Kprom.	$4.9936 \times 10^{-5}$	$2.5399 \times 10^{-5}$	$1.2763 \times 10^{-5}$

## GRADO DE COMPACTACION 100 %

PRUEBA NUM.	H U M E D A D		
	24.5 %	26.0 %	27.5 %
1	$8.5055 \times 10^{-6}$	$5.8905 \times 10^{-6}$	$3.7524 \times 10^{-6}$
2	$1.3025 \times 10^{-5}$	$4.4595 \times 10^{-6}$	$3.7339 \times 10^{-6}$
Kprom.	$1.0765 \times 10^{-5}$	$5.1750 \times 10^{-6}$	$3.7431 \times 10^{-6}$

## RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PERMEABILIDAD ARCILLA GRIS

## GRADO DE COMPACTACION 90 %

PRUEBA NUM.	H U M E D A D		
	21.1 %	22.6 %	24.1 %
1	$2.5803 \times 10^{-4}$	$1.1120 \times 10^{-4}$	$9.5911 \times 10^{-5}$
2	$1.6132 \times 10^{-4}$	$9.6794 \times 10^{-5}$	$8.0562 \times 10^{-5}$
Kprom.	$2.0967 \times 10^{-4}$	$1.0399 \times 10^{-4}$	$8.8286 \times 10^{-5}$

## GRADO DE COMPACTACION 95 %

PRUEBA NUM.	H U M E D A D		
	21.1 %	22.6 %	24.1 %
1	$2.6941 \times 10^{-5}$	$1.5135 \times 10^{-5}$	$9.1458 \times 10^{-6}$
2	$2.4339 \times 10^{-5}$	$1.5539 \times 10^{-5}$	$8.6426 \times 10^{-6}$
Kprom.	$2.5640 \times 10^{-5}$	$1.5334 \times 10^{-5}$	$8.8942 \times 10^{-6}$

## GRADO DE COMPACTACION 100 %

PRUEBA NUM.	H U M E D A D		
	21.1 %	22.6 %	24.1 %
1	$1.3322 \times 10^{-5}$	$8.3018 \times 10^{-6}$	$1.6723 \times 10^{-6}$
2	$1.3605 \times 10^{-5}$	$7.7769 \times 10^{-6}$	$3.5088 \times 10^{-6}$
Kprom.	$1.3463 \times 10^{-5}$	$8.0393 \times 10^{-6}$	$3.5905 \times 10^{-6}$

RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA  
DE PERMEABILIDAD

	W <sub>o</sub> %	PERMEABILIDAD	G <sub>e</sub> %
A R C I L L A R A	33.5	$6.9498 \times 10^{-6}$ "	100
	35.0	$2.2846 \times 10^{-6}$ "	
	36.5	$1.2226 \times 10^{-6}$ "	
	33.5	$6.8000 \times 10^{-5}$ "	95
	35.0	$3.0129 \times 10^{-5}$ "	
	36.5	$1.8462 \times 10^{-5}$ "	
	33.5	$4.8260 \times 10^{-4}$ "	90
	35.0	$2.9893 \times 10^{-4}$ "	
	36.5	$1.7228 \times 10^{-4}$ "	
A R C I L L A R E I O S C U R A	24.5	$10.765 \times 10^{-6}$ "	100
	26.0	$5.3752 \times 10^{-5}$ "	
	27.5	$3.7431 \times 10^{-6}$ "	
	24.5	$4.9936 \times 10^{-5}$ "	95
	26.0	$2.5399 \times 10^{-5}$ "	
	27.5	$1.2763 \times 10^{-5}$ "	
	24.5	$3.5827 \times 10^{-4}$ "	90
	26.0	$2.2205 \times 10^{-4}$ "	
	27.5	$1.2481 \times 10^{-4}$ "	
A R C I L L A R G R I S	21.1	$11.463 \times 10^{-6}$ "	100
	22.6	$8.0393 \times 10^{-6}$ "	
	24.1	$3.5905 \times 10^{-6}$ "	
	21.1	$2.5640 \times 10^{-5}$ "	95
	22.6	$1.5334 \times 10^{-5}$ "	
	24.1	$0.8994 \times 10^{-5}$ "	
	21.1	$2.0967 \times 10^{-4}$ "	90
	22.6	$1.0399 \times 10^{-4}$ "	
	24.1	$0.8828 \times 10^{-4}$ "	

## CAPITULO VI

## CONCLUSIONES

Al finalizar este trabajo de investigación de los estudios— de permeabilidad y expansión, que se realizaron a los tres materiales arcillosos, compactados en forma estática de diferentes grados de compactación y diferentes humedades; se comparan los resultados obtenidos llegando a las siguientes conclusiones.

## A) PERMEABILIDAD.

- 1.- A medida que aumenta el grado de compactación del suelo, la permeabilidad disminuye. Esto se debe, porque se va cerrando la relación de huecos del suelo.
- 2.- Para un mismo grado de compactación, la permeabilidad disminuye al aumentar el contenido de agua en el espécimen.

## B) EXPANSION.

- 1.- Cuando se tiene una mayor humedad en el espécimen, la expansión que se genera es mínima.
- 2.- Cuando el espécimen se somete a saturar en el agua con una sobrecarga, la expansión que se manifiesta es mínima y aumenta cuando se deja expandir libremente.
- 3.- Para obtener resultados más aproximados de la expansión en el laboratorio, es necesario mantener la muestra en el agua en un tiempo de quince días por lo menos, esto va a depender del grado de compactación del suelo en estudio, porque a las 72 hrs. de saturación no da resultados predecibles, ya que se sigue expandiendo.

- 4.- La expansión, a tres días al aumentar el grado de compactación, aumenta hasta un máximo para luego disminuir. El máximo se presentó aproximadamente con el 95 % de compactación-proctor 30 golpes.
- 5.- La expansión, a tres días en los especímenes compactados al 110 % fue menor al de los compactados a 90 %.
- 6.- Para que los bordos de contención de las obras pequeñas no presenten problemas de infiltración y expansión muy considerables en los suelos arcillosos, es recomendable compactar el suelo a un grado comprendido de 95 % al 100 % ; pero con una humedad superior a la óptima en 1.5 %, con respecto a la proctor 30 golpes, así la permeabilidad que se presenta es mínima y el porcentaje de expansión disminuye.
- 7.- Si el suelo es compactado a un grado menor de 95 %, la expansión que se presenta es menor, pero tiene la desventaja de que la permeabilidad es mayor; y cuando se compacta a un grado mayor de 100 % la expansión que se presenta es mayor a largo plazo, disminuyendo así el grado de compactación — del suelo y como consecuencia aumenta la permeabilidad.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Fundamentos de la Mecánica de Suelos.  
Tomo I  
Eulalio Juárez Badillo  
Alfonso Rico Rodríguez  
Editorial Limusa
  
- 2.- Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica.  
Karl Terzaghi  
Ralph B. Peck  
Segunda Edición
  
- 3.- Mecánica de Suelos.  
R. F. Graig  
Logos Consorcio Editorial S. A.
  
- 4.- Principio de Geología y Geotecnia para Ingenieros.  
Krinine, Dimitri P.
  
- 5.- La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres.  
Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas  
Alfonso Rico Rodríguez  
Volumen 1  
Editorial Limusa

- 6.- Manual de Mecánica de Suelos de la  
Secretaría de Recursos Hidráulicos.  
Quinta Edición 1970
  
- 7.- Normas para Muestreo y Pruebas de  
Materiales, Equipos y Sistemas  
Libro 6, Parte 6.01  
Carreteras y Aeropistas, S. C. T.
  
- 8.- Suelos Expansivos.  
Mondragón Quiroz German  
Tesis U.N.A.M. México 1982
  
- 9.- Clasificación y Estudio de Cimentaciones  
en Arcillas Expansivas.  
Julio A. Estrada C.  
Tesis Universidad Anáhuac
  
- 10.- Presas de Tierra y Enrocamiento.  
Raúl J. Marsal y Daniel Resendiz Nufies  
Editorial Limusa  
México 1979
  
- 11.- Compactación y Control de Calidad.  
Raúl V. Grosco S.  
Coconal, S. A.