24; 69

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PRUEBAS DE PERMEABILIDAD EN SUELOS FINOS COMPACTADOS

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

p r e s e n t a :

MARIA EVANGELINA GUTIERREZ AYALA

México, D. F. 1981

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

FACULTAD DE INGENIERIA
EXAMENES PROFESIONALES
60-1-50

A la Pasante Srita. EVANGELINA GUTIERREZ AYALA,
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor Ing. Gabriel Auvinet Guichard, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero CIVIL.

"PRUEBAS DE PERMEABILIDAD EN SUELOS FINOS COMPACTADOS"

1. Introducción.
2. Parámetros que influyen en la permeabilidad.
3. Diseño y construcción de un permeámetro de carga variable.
4. Pruebas.
5. Conclusiones.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, 25 de marzo de 1981
EL DIRECTOR

ING. JAVIER JIMENEZ ESPRIU

JJE/OBLH/ser

I N D I C E

		pág.
1.	INTRODUCCION	1
2.	PARAMETROS QUE INFLUYEN EN LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS FINOS	3
	2.1 *Estructura y relación de vacíos*	4
	2.2 *Grado de saturación*	10
	2.3 *Composición mineralógica del suelo*	11
	2.4 *Tipo de fluido*	13
3.	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PERMEAMETRO DE CARGA VARIABLE	14
	3.1 *Antecedentes*	14
	3.2 *Desarrollo del permeámetro*	22
	3.3 *Preparación de las muestras*	28
	3.4 *Proceso de prueba*	33
4.	PRUEBAS	42
	4.1 *Pruebas en suelos plásticos*	42
	4.2 *Pruebas en suelos no plásticos*	50
	4.3 *Evaluación del permeámetro*	53
5.	CONCLUSIONES	56
	REFERENCIAS	
	APENDICES	

LISTA DE FIGURAS

1	Modelo sencillo para el flujo a través de suelos finos
2	Curva típica de compactación
3	Permeabilidad vs contenido de agua de compactación para la prueba AASHO de amasado
4	Influencia del método de compactación en la permeabilidad de una arcilla limosa
5	Permeabilidad de una arcilla limosa con una grado de saturación del 100% para tres diferentes energías
6	Permeabilidad de muestras con igual peso volumétrico seco y grados de saturación del 90 y 95 por ciento
7	Gráfica de relación de vacíos contra permeabilidad para arcillas de diferentes composiciones mineralógicas
8	Permeámetro de carga variable
9	Permeámetro de carga variable con sello de parafina y gel bentonítico
10	Permeámetro utilizado en el Departamento de Estudios Experimentales de CFE
11	Sistema del permeámetro de carga variable diseñado en el Instituto de Ingeniería
12	Depósito de agua desaereada
13	Filtro de aire
14	Permeámetro
15	Curva de calibración del resorte
16	Molde de compactación para pruebas de permeabilidad
17	Esquema del labrado de un espécimen para prueba de permeabilidad a partir de una muestra cúbica
18	Esquema de la colocación de una muestra en el permeámetro
19	Permeámetro listo para colocarse en el sistema

20 Numeración de válvulas y reguladores en el sistema

21 Hoja de registro

22 Curvas de compactación y permeabilidad del material tipo I

23 Curvas de compactación y permeabilidad del material tipo II

24 Variación del coeficiente de permeabilidad con el tiempo. Muestras del material tipo I

25 Curvas granulométricas de la fracción gruesa de los suelos ensayados

1.1 Tapas del depósito de agua desaereada (fig 12)

1.2 Tapas del filtro de aire (fig 13)

1.3 Esquema del permeámetro

1.3.a Anillo metálico del permeámetro

1.3.b Tapa superior

1.3.c Tapa inferior

1.3.d.1 Cilindros superior e inferior

1.3.d.2 Cilindro inferior en planta

1.3.e Barras, aros y tuercas para cerrar el permeámetro

1.3.f Placa de latón perforada

SIMBOLOS

A	área de la muestra
a	área del tubo de entrada al permeámetro
a_v	coeficiente de compresibilidad
CL	arcilla de baja compresibilidad
δ	deformación total
e	relación de vacíos
E_c	energía de compactación
G_s	densidad de sólidos
γ_d	peso específico seco
γ_d	peso específico del agua
h_c	altura capilar
i	gradiente hidráulico
I_p	índice plástico
k	coeficiente de permeabilidad
K	permeabilidad absoluta
k	kilo (10^3)
M	mega (10^6)
ML	limo de baja compresibilidad
μ	coeficiente de viscosidad dinámica
N	newton
Pa	pascal
SC	arena arcillosa
SP	arena mal graduada

S_r	grado de saturación
t	tiempo
v	velocidad
w_c	contenido de agua de compactación
w_L	límite líquido
w_{opt}	contenido de agua óptimo
w_P	límite plástico

1. INTRODUCCION

La permeabilidad de los suelos finos reviste gran importancia para el diseño de muchas obras civiles tradicionales como las presas de tierra y canales. Este parámetro tiene aún más importancia en los almacenamientos artificiales, en los cuales las filtraciones se traducen en costos muy altos, debido al valor del fluido almacenado (agua bombeada desde grandes distancias, productos químicos, etc.). Por ello es útil conocer los factores que influyen en la permeabilidad de una manera determinante y contar con medios que permitan evaluarla confiablemente.

En el presente trabajo se incluye una breve discusión de los principales parámetros que afectan la permeabilidad de los suelos finos. Se analizan, asimismo los métodos existentes para determinar dicha permeabilidad y se presenta el diseño de un nuevo permeámetro de carga variable. A continuación, se incluyen

los resultados de un estudio experimental acerca de la influencia del contenido de agua de compactación sobre la permeabilidad de dos arcillas y se describe cómo pudo aprovecharse para la impermeabilización de un estanque de enfriamiento de 300 ha; también se presenta un estudio de permeabilidad en suelos no plásticos, con diferentes compacidades y bajo distintas contrapresiones. Finalmente, se hace una evaluación de la confiabilidad del permeámetro desarrollado y se presentan conclusiones relativas a los logros alcanzados y a los enfoques más prometedores para estudios del mismo tipo en el futuro.

2. PARAMETROS QUE INFLUYEN EN LA PERMEABILIDAD DE SUELOS FINOS

En la actualidad, se acepta que el flujo laminar a través de suelos finos se rige por la Ley de Darcy:

$$v = k\, i \qquad (1)$$

donde:

- v es la velocidad de filtración, en m/s
- k es el coeficiente de permeabilidad, en m/s
- i es el gradiente hidráulico

Las características de los suelos finos que más afectan al coeficiente de permeabilidad son: estructura, relación de vacíos y grado de saturación (ref 8), también influyen la composición mineralógica del suelo y el tipo de fluido.

Es conveniente distinguir entre suelos naturales y compactados. En los primeros, las características actuales son el resultado de las condiciones a las que hayan estado sujetos durante su historia. En los compactados estas características son el producto de una serie de factores controlables, tales como contenido de agua, método y energía de compactación.

2.1 *Estructura y relación de vacíos*

Son factores íntimamente ligados, puesto que la relación de vacíos depende de la estructura de los suelos.

Terzaghi intentó expresar la permeabilidad de los suelos como función de la relación de vacíos (ref 5), mediante las relaciones:

$$k = k' \; F(e)$$

con $F(e) = e^2$ para arenas

$F(e) = C_3 \; (e - e_0)^2$ para arcillas (2)

Donde C_3, es una constante de ajuste tal que $k = k'$, para $F(1) = 1$; $(e - e_0)$ es la *relación de vacíos efectiva*, considerada como el espacio en el que efectivamente se presenta el flujo del agua.

Kozeny dió otra expresión, que posteriormente fue mejorada por Carman (ref 6), la cual también expresa la permeabilidad en función de la relación de vacíos; esta ecuación, llamada de Kozeny-Carman, es:

$$k = \frac{1}{k_0 S^2} \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{1 + e} \qquad (3)$$

donde

k coeficiente de permeabilidad de Darcy, en m/s

k_0 factor dependiente de la forma de los poros y de la relación entre la longitud de la trayectoria real del flujo y el espesor del estrato atravesado

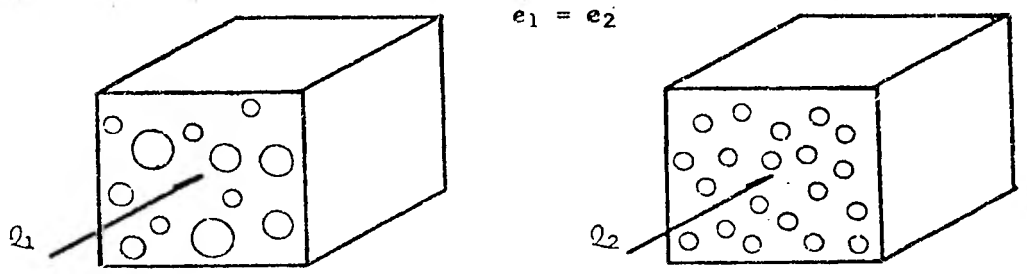
S superficie específica, en m^2/m^3

γ peso específico del fluido, en N/m^3

μ viscosidad del fluido, en poiseuilles

e relación de vacíos

Con las fórmulas anteriores no se obtienen buenos resultados, especialmente en arcillas, lo que debe atribuirse a que la relación de vacíos no es suficiente para definir el arreglo que guardan las partículas entre sí. Para igual relación de vacíos pueden existir estructuras completamente diferentes (fig 1, ref 1), y por tanto permeabilidades diferentes.



a) Tubos con diferentes tamaños b) Tubos de tamaño uniforme

FIG 1 Modelo sencillo para el flujo a través de suelos finos

La fig 1a representa un suelo con poros de diferentes tamaños que dejan pasar un gasto Q_1. En la fig 1b, se supuso que se logró por algún método, que dichos poros tuvieran un tamaño más uniforme (manteniendo la relación de vacíos constante). El flujo Q_2 será en este caso mucho menor que Q_1, habiéndose reducido de acuerdo con la ley de Poiseuille (ref 5), con la cuarta potencia del diámetro de cada poro lo que implica un flujo mucho menor debido a la desaparición de los poros de tamaño mayor. Los factores que afectan a la estructura y a la relación de vacíos son los mismos (contenido de agua, método y energía de compactación), aunque su influencia es de diferente magnitud en ambas.

2.1.1 Influencia del contenido de agua de compactación

Al compactar un suelo con cierta energía y método de aplicación constante, pero variando el contenido de agua, se obtiene una *curva de compactación* como la de la fig 2, donde se observa que existe un contenido de agua para el cual el peso volumétrico del suelo es máximo, y que se conoce como *contenido de agua óptimo*. La parte de la curva que corresponde a contenidos de agua superiores al óptimo se llama *rama húmeda* y se caracteriza porque en ella el suelo presenta estructura dispersa, en tanto que la parte de menor contenido de agua que el óptimo se denomina *rama seca* y en esta rama el suelo presenta una estructura floculenta (ref 7). En los experimentos de Mitchell, Hooper y Campanella sobre una arcilla limosa, con LL = 37% e IP = 14%, se pone de manifiesto que la permeabilidad de los suelos finos se reduce drásticamente al aumentar el contenido de agua de compactación, debido al cambio de tipo de estructura (fig 3, ref 9).

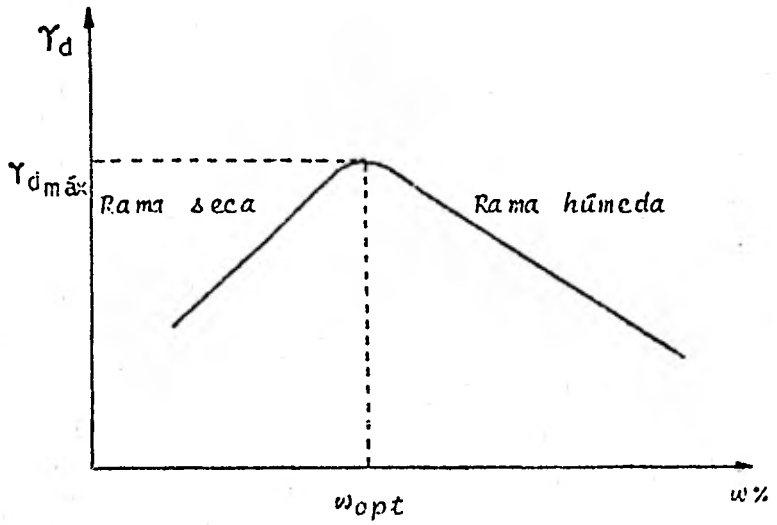


FIG 2 Curva típica de compactación

2.1.2 Influencia del método de compactación

La influencia del método de compactación se debe a la magnitud de las deformaciones angulares que se inducen en el suelo, estas deformaciones son más fáciles de producir cuando las muestras se compactan con contenidos de agua superiores al óptimo; bajo esa condición, el método de amasado es el más efectivo para cambiar la estructura del suelo y hacerla ocluida, en comparación con el estático y el dinámico, respectivamente. En la fig 4 (ref 9), se observa que en la rama seca casi no hay diferencia entre los valores de permeabilidad obtenidos con la compactación estática y con la de amasado, principiando a marcarse la diferencia entre ambas a partir de un contenido de agua dos por ciento mayor que el óptimo.

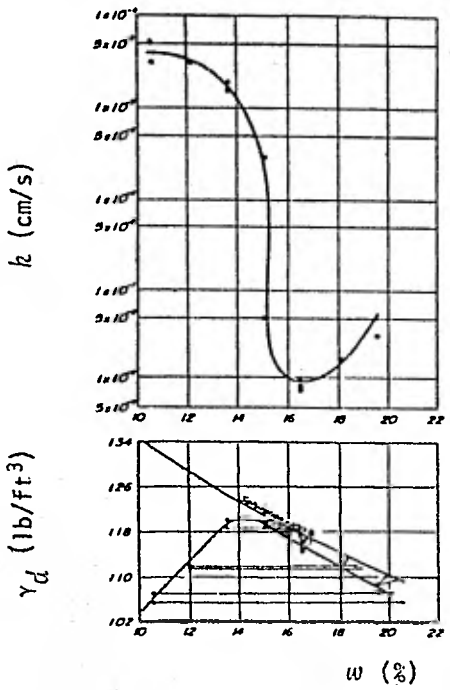


FIG 3 Permeabilidad vs contenido de agua de compactación para la prueba AASHO de amasado

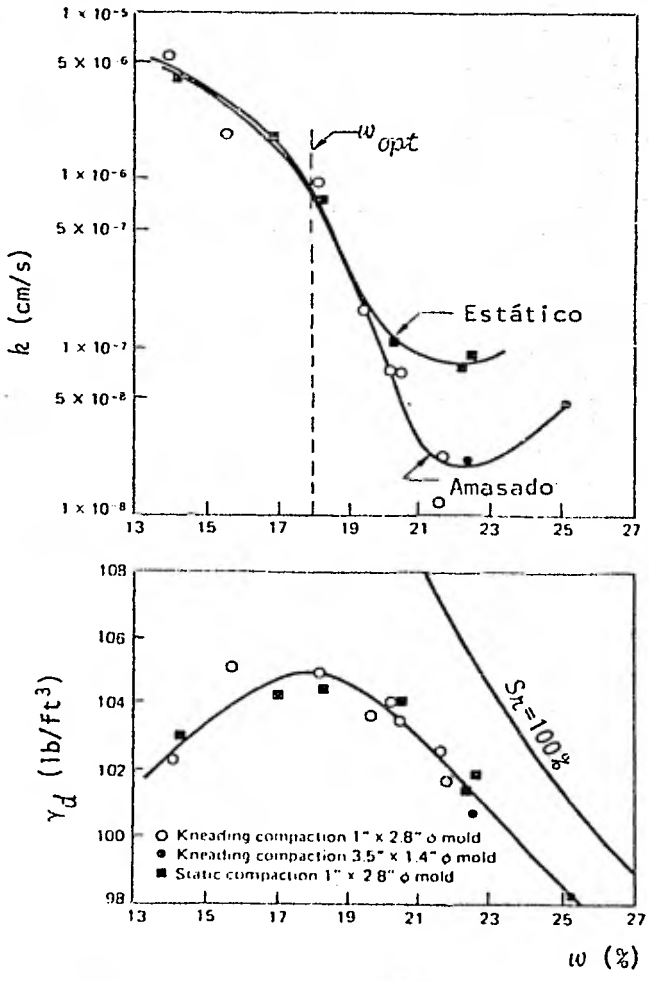


FIG 4 Influencia del método de compactación en la permeabilidad de una arcilla limosa

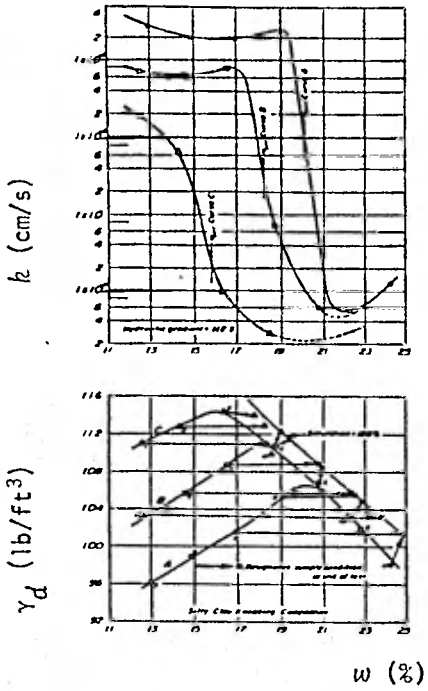


FIG 5 Permeabilidad de una arcilla limosa con un grado de saturación del cien por ciento para tres diferentes energías de compactación

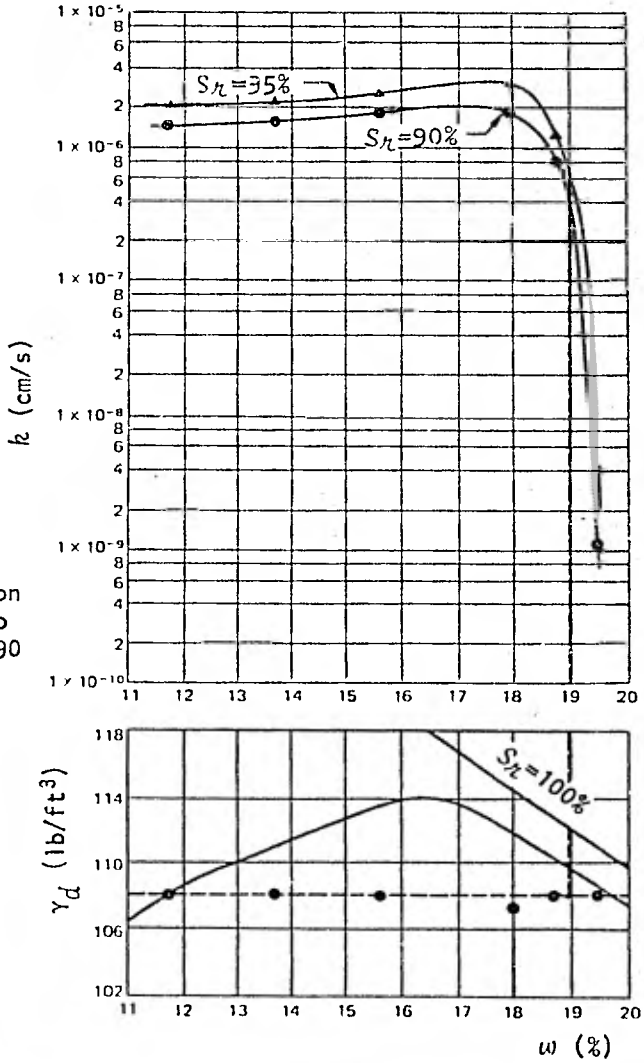


FIG 6 Permeabilidad de muestras con igual peso volumétrico seco y grados de saturación de 90 y 95 por ciento

2.1.3 Influencia de la energía de compactación

Cuando se compacta un suelo con energías crecientes, se observa que las curvas se desplazan hacia arriba y a la izquierda, y sus ramas húmedas quedan aproximadamente sobre una línea de igual grado de saturación, ésto se refleja en una disminución del contenido de agua óptimo para las curvas de mayor energía. Además, al ensayar muestras que, para las diferentes energías, quedaron del lado seco, se vió que a mayor energía su permeabilidad disminuye, y que la permeabilidad de las muestras con contenidos de agua altos tiende a un mismo valor, independiente de la energía aplicada (fig 5, ref 9).

2.2 *Grado de saturación*

Cuando un suelo no está saturado, se presenta el fenómeno de *succión* debido a los potenciales *mátrico* (adsorción y capilaridad) y *ósmótico* (refs 7 y 10); así, un suelo parcialmente saturado que se ponga en contacto con agua tratará de absorberla con una rapidez dependiente del tipo de suelo y de la composición del agua. Por esto, antes de realizar una prueba de permeabilidad debe llevarse el espécimen a grados de saturación suficientemente elevados, con el fin de reducir considerablemente los gradientes de succión, y así medir la cantidad de agua que realmente pasa a través del suelo por gradiente hidráulico y no aquella que éste absorbe.

En los experimentos de Mitchell, J. K, *et al* (1965) se investigó la influencia del grado de saturación sobre la permeabilidad, encontrándose que esta relación es prácticamente lineal y que una buena aproximación de dicha relación está dada por:

$$k = \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{C_s V_s^2}{A_s^2} \frac{e^3}{1+e} S_r^3 \qquad (3)$$

donde

k	coeficiente de permeabilidad, en m/s
γ_w	peso volumétrico del agua, en N/m^3
μ	viscosidad del agua, en poiseuilles
C_s	coeficiente de forma
A_s	área mojada, en m^2
e	relación de vacíos
S_r	grado de saturación

También se observó que para grados de saturación mayores que 90% , la variación de la permeabilidad no es significativa (fig 6).

2.3 *Composición mineralógica del suelo*

Se sabe que los cationes más comunes en los suelos finos son Li^+, Na^+, K^+, Ca^{++}, Mg^{+++} y Al^{+++}, de los cuales los de una sola valencia generalmente forman parte de suelos con estructuras más cerradas o dispersas. Los suelos que contienen cationes divalentes o trivalentes, en comparación con los anteriores, forman estructuras más abiertas o floculentas.

Las fuerzas de atracción de las partículas minerales de arcilla hacia los cationes en general son más fuertes para los de mayor valencia. Este fenómeno es la causa de que los cationes monovalentes sean reemplazados con facilidad, lo que comunmente se da en el siguiente orden (ref 4).

$$Al^{+++} > Ca^{++} > Mg^{++} > K^{+} > Na^{+} > Li^{+}$$

Algunas de las observaciones anteriores se ponen de manifiesto en la fig 7, (ref 6), donde se muestra que para una relación de vacíos igual a 7, la permeabilidad de una montmorilonita cálcica es de aproximadamente 300 veces mayor que la de una montmorilonita potásica y que la influencia de los iones de cambio es menor para la caolinita que para la montmorilonita, debido a que la estructura mineralógica de la primera es más estable.

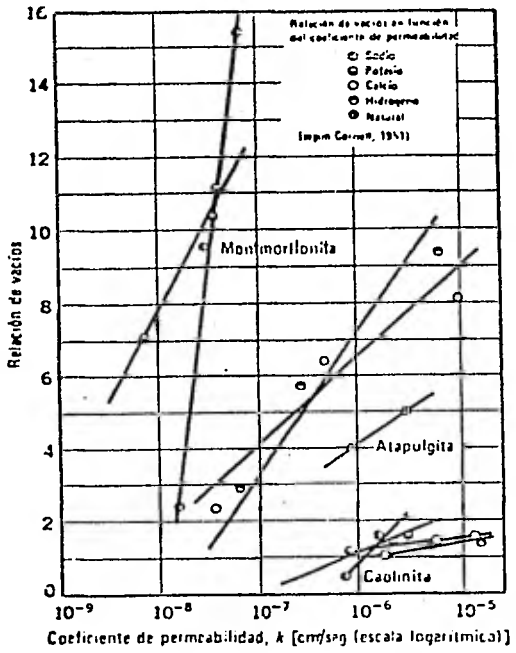


FIG 7 Gráfica de relación de vacíos contra permeabilidad para arcillas de diferentes composiciones mineralógicas

2.4 *Tipo de fluido*

La ecuación de Kozeni-Carman (subcap. 2.1), muestra que tanto el peso específico como la viscosidad del fluido son factores que afectan la permeabilidad; sin embargo, ambas variables pueden eliminarse de la ecuación, definiendo una permeabilidad *específica o absoluta* K (ref 6)

$$K = \frac{k\,\mu}{\gamma} \qquad (5)$$

En la cual K está dada en m^2, k en m/s, μ en poiseuilles y γ en N/m^3.

Para agua a 20° C, se cumple la siguiente ecuación (ref 6).

$$K, \text{ en } m^2 = k, \text{ en m/s} \times 1.02 \times 10^{-2} \qquad (6)$$

La composición del fluido facilita o dificulta también su paso a través del suelo, debido a la interacción de la composición mineralógica del suelo con los cationes o aniones que contenga el fluido; en el caso del agua, son: H^+, Na^+, Ca^{++}, Mg^{++}, NH^+, OH^-, Cl^-, HCO^-, NO^-, SO^{--} CO^{--}; así, si son cationes los que lleva el agua, sustituirán a los de menor valencia del suelo, pero si son aniones, las fuerzas de repulsión entre las partículas del suelo aumentarán, pudiéndose llegar a producir arcillas de tipo *dispersivo*.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PERMEAMETRO DE CARGA VARIABLE

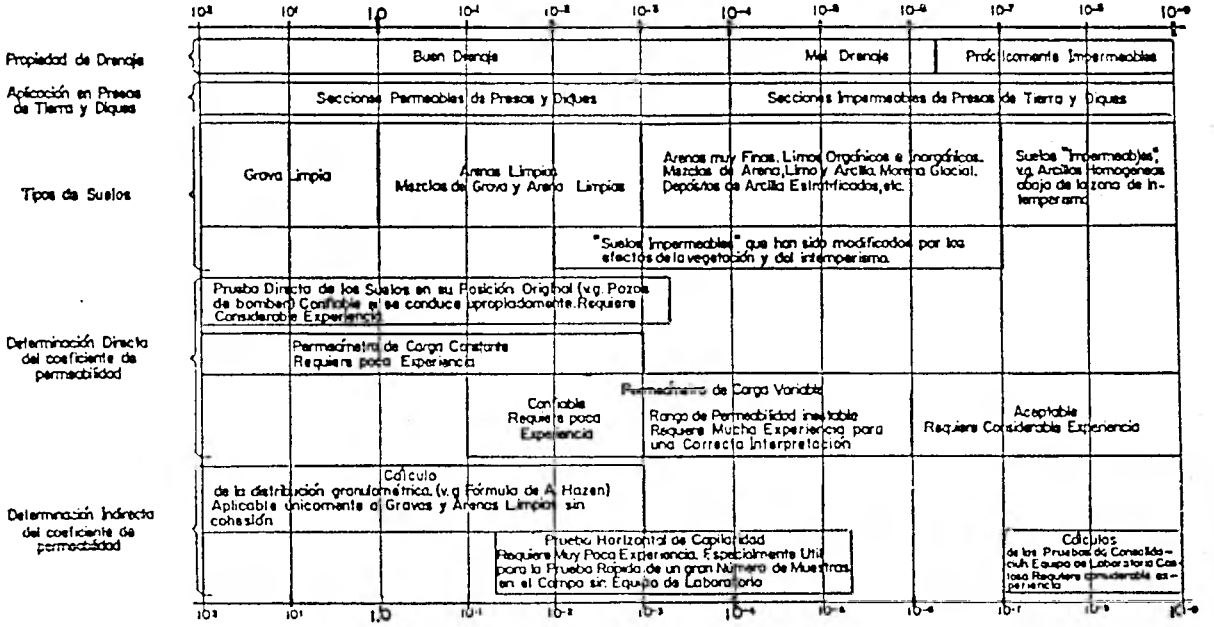
3.1 *Antecedentes*

Para determinar el coeficiente de permeabilidad de los suelos finos se puede proceder de varias maneras, unas más sencillas que otras, pero la que se escoja debe estar acorde con las condiciones del problema que se analice.. En la tabla 1 (ref 5) se presenta una guía sencilla para elegir el método adecuado, dependiendo del tipo de suelo; a continuación se comentan algunas ventajas y desventajas de estos métodos, así como las del uso de la cámara triaxial, para evaluar dicho coeficiente.

3.1.1 Prueba horizontal de capilaridad (ref 5)

Mediante el ensaye horizontal de capilaridad se pueden realizar de manera fácil y rápida gran número de pruebas, obteniéndose valores aproximados del coeficiente de permeabilidad. Esta prueba es aplicable cuando dicho coeficiente

TABLA 1 Guía sencilla para elegir el método de obtención del coeficiente de permeabilidad



k en cm/s

tiene valores entre 1×10^{-4} y 1×10^{-7} m/s; es muy útil cuando se requiere llevar un control de obra en el campo.

3.1.2 Prueba de consolidación (ref 5)

Por medio de esta prueba se puede evaluar indirectamente el coeficiente de permeabilidad de suelos finos saturados, la fórmula que se emplea es

$$k = \frac{a_v \; H^2 \; \gamma_w}{5(1 + e) \; t_{50}} \qquad (7)$$

donde

k	coeficiente de permeabilidad de Darcy, en m/s
a_v	coeficiente de compresibilidad, en Pa^{-1}
H	espesor efectivo de la muestra, en el instante t_{50}, en m
γ_w	peso volumétrico del agua, en N/m^3
e	relación de vacíos
t_{50}	tiempo en el que se llega a un grado de consolidación primaria del 50 por ciento, en s

que son datos obtenidos de la prueba de consolidación. El coeficiente obtenido por esta fórmula es un valor medio que se supone constante a lo largo del fenómeno de la consolidación, suposición bastante alejada de la realidad; a pesar de ésto, el método es de uso frecuente ajustándose el valor obtenido de acuerdo con el criterio y experiencia del diseñador. Este método no es aplicable en suelos con grados de saturación menores que 100% (caso general de los suelos compactados).

En algunas ocasiones se han adaptado consolidómetros para medir directamente la permeabilidad; sin embargo, esta práctica no es recomendable debido a la interferencia entre ambas pruebas.

3.1.3 Permeámetros de carga variable

A medida que se ha requerido mayor precisión en los ensayes de permeabilidad en suelos finos, se han desarrollado permeámetros de carga variable de diferentes características, con las cuales se pretende corregir errores tales como el contacto entre la muestra y el recipiente, y la saturación del espécimen. Para el primero se han usado diferentes tipos de sellos y para el segundo vacío o contrapresiones.

En la fig 8 se presentan esquemáticamente dos permeámetros de carga variable, los cuales miden la cantidad de agua que atraviesa la muestra, por diferencia de niveles en el tubo de entrada. La ecuación utilizada es (ref 5)

$$k = 2.3 \frac{La}{tA} \log \frac{h_1}{h_2} \qquad (8)$$

donde:

L, a, A, h_1 y h_2, tienen el significado indicado en la misma figura.

(a) Para suelos finos

(b) Para suelos gruesos

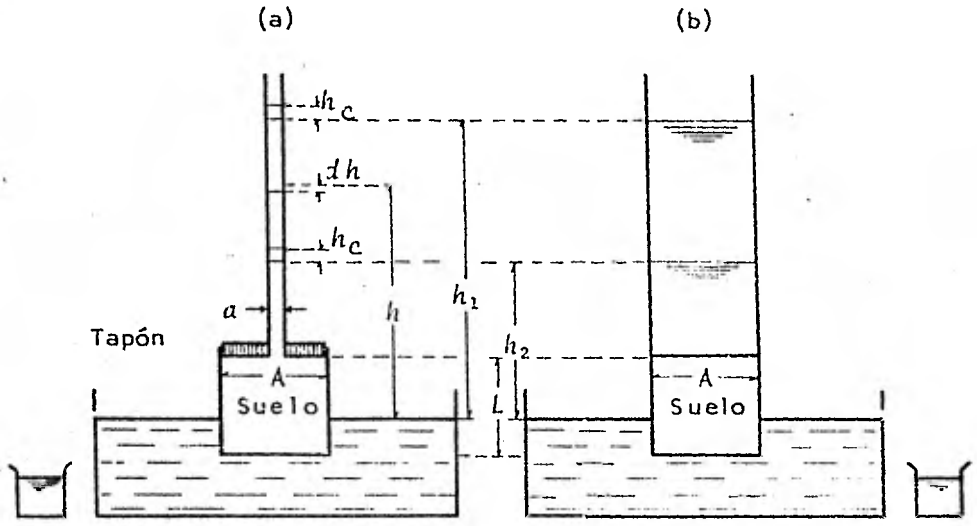


FIG 8 Permeámetros de carga variable

En la fig 9, se muestra el esquema de un permeámetro de carga variable, en el cual se utiliza un sello de gel bentonítico y parafina para proteger el contacto suelo-recipiente. En la práctica se observó que este sello no es recomendable debido a que con el tiempo se contrae y agrieta, en algunos casos se ha preferido compactar el suelo en el mismo recipiente en que se realiza el ensaye, obteniéndose mejores resultados.

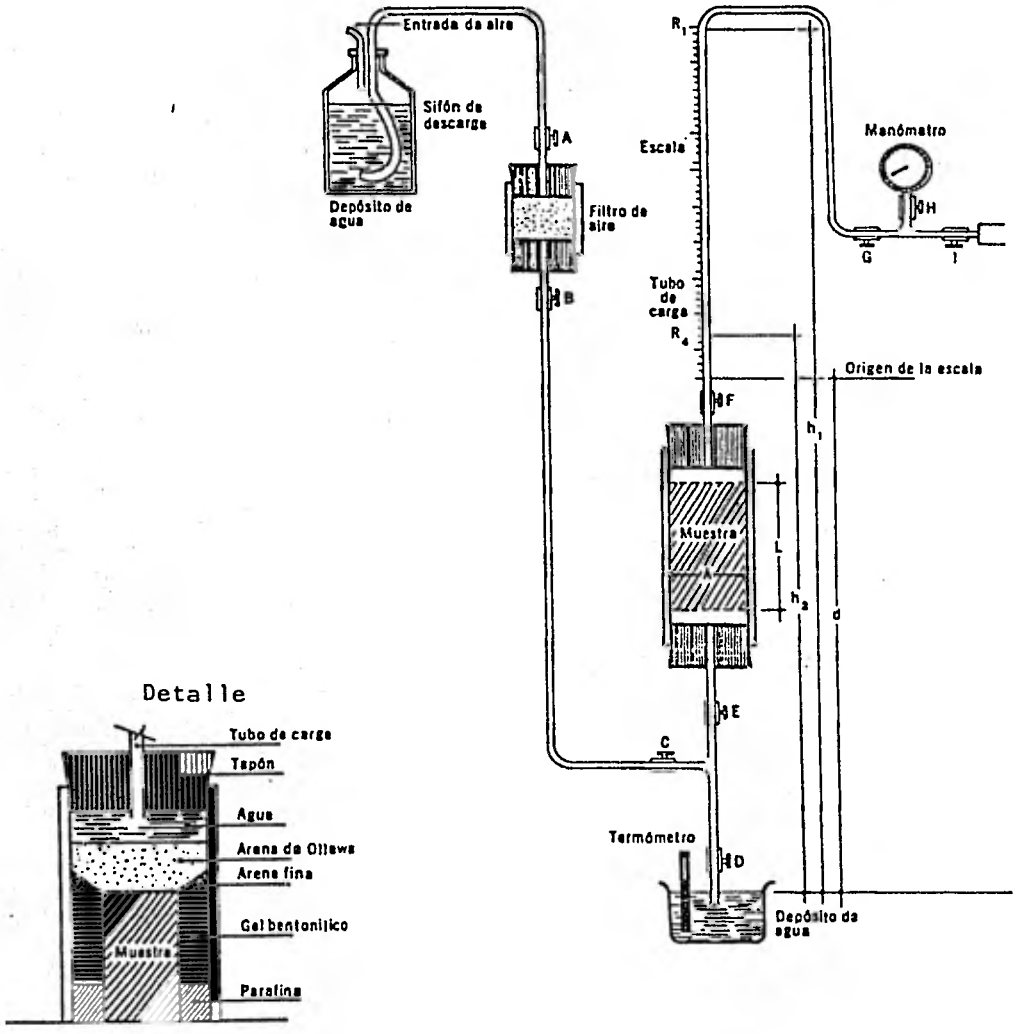


FIG 9 Permeámetro de carga variable con sello de parafina y gel bentonítico

Recientemente, Sedano y Auvinet (1979), diseñaron un permeámetro en el que el sello de la muestra y el recipiente se resuelve mediante grasa inyectada a - presión; posteriormente dicho diseño se mejoró al hacer uso de una membrana de látex y aire a presión para confinar la muestra. Además, se incluyó la utilización de contrapresión para lograr una saturación más efectiva de los especímenes y la medición del gasto de entrada y del de salida para verificar que - la muestra no absorbe agua durante el ensaye. En la fig 10, se muestra un esquema de este permeámetro, utilizado en el Departamento de Estudios Experimentales de CFE.

En el presente trabajo, realizado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se mejoró el diseño anterior con el propósito de aumentar la capacidad de aplicación de la contrapresión de 0.2 MPa (2 kg/cm^2) a 0.6 MPa (6 kg/cm^2), para poder llevar las muestras a grados de saturación más elevados.

3.1.4 Cámara triaxial

Otro instrumento que se puede utilizar para evaluar la permeabilidad es la cámara triaxial, modificada de tal manera que sea posible medir el volumen de agua que pasa a través de la muestra, habiéndola saturado previamente. Una limitación importante de este método es que el área transversal de la muestra es muy reducida; además, su longitud es considerable, por lo que el tiempo de prueba resulta muy grande, sobre todo en suelos poco permeables. Sin embargo, en un laboratorio donde no se disponga de un permeámetro confiable, la cámara triaxial es una alternativa diferente a la prueba de consolidación en la cual no - es necesario tener una gran experiencia para la evaluación de los resultados,

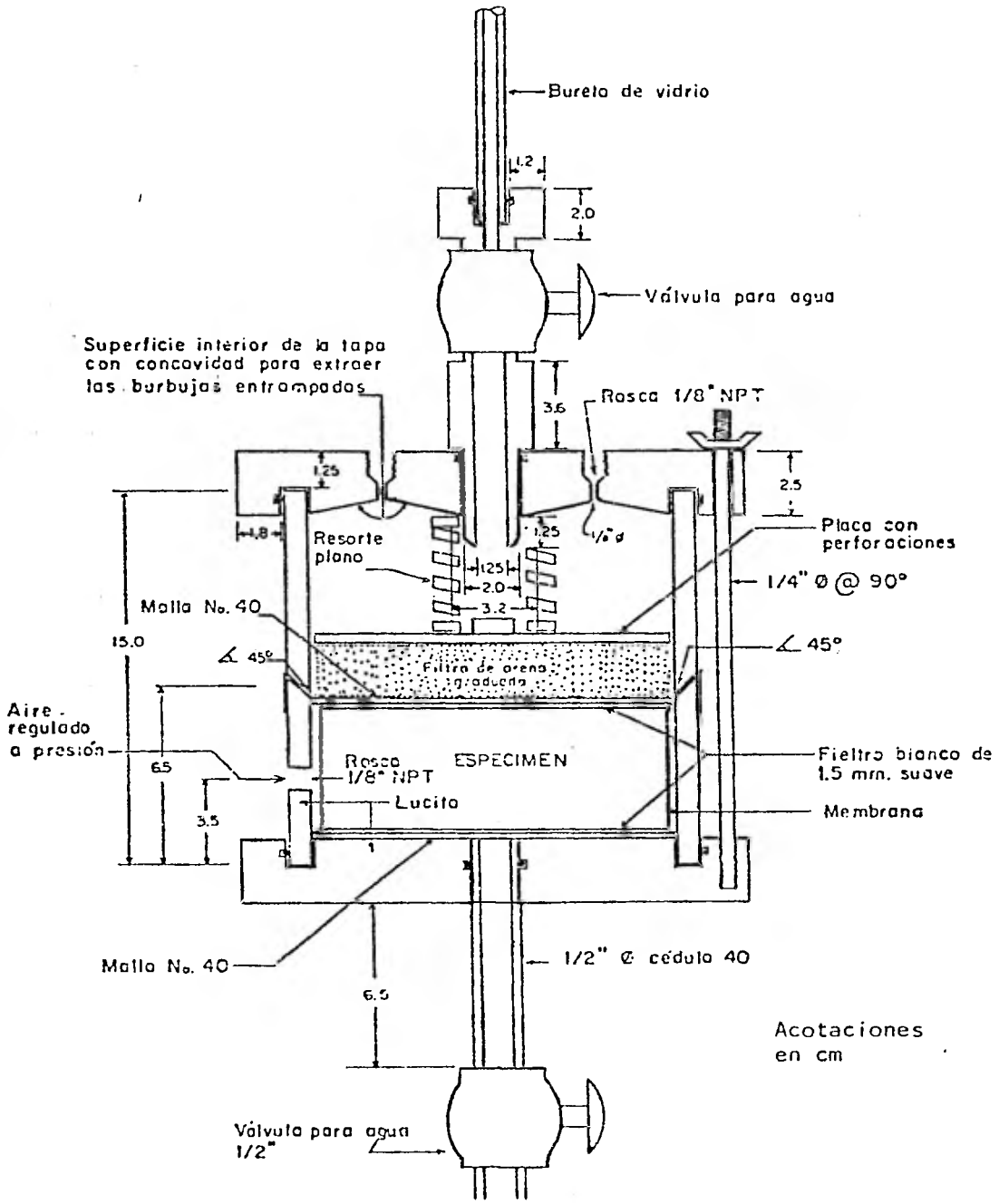


FIG 10 Permeámetro utilizado en el Departamento de Estudios Experimentales de CFE (ref 3)

ya que su obtención es directa y la aplicación de los esfuerzos en la cámara es controlable.

3.2 *Desarrollo del permeámetro*

El propósito principal del diseño presentado a continuación es evitar algunos de los problemas ya mencionados, que se presentan en la realización de ensayes de permeabilidad en suelos finos (inciso 3.1.3).

3.2.1 Características generales

- Es de carga variable
- Se pueden aplicar gradientes hasta de 20
- El intervalo de coeficientes k, que se pueden medir es de $1 \times 10^{-5} < k < 1 \times 10^{-11}$ m/s
- Es posible aplicar una contrapresión hasta de 0.6 MPa
- El área de la muestra es grande, por lo que se tiene un menor efecto de escala y una mayor precisión
- El sello se logra con una membrana de látex y aire a presión
- Es posible compactar la muestra directamente en el recipiente del permeámetro

3.2.2 Descripción del permeámetro

Es un sistema cuyos principales elementos son: un depósito de agua desaereada, un filtro de aire, el permeámetro propiamente dicho, dos buretas, reguladores, manómetros y válvulas, dispuestos como se muestra en la fig 11. A continuación se describen estos componentes.

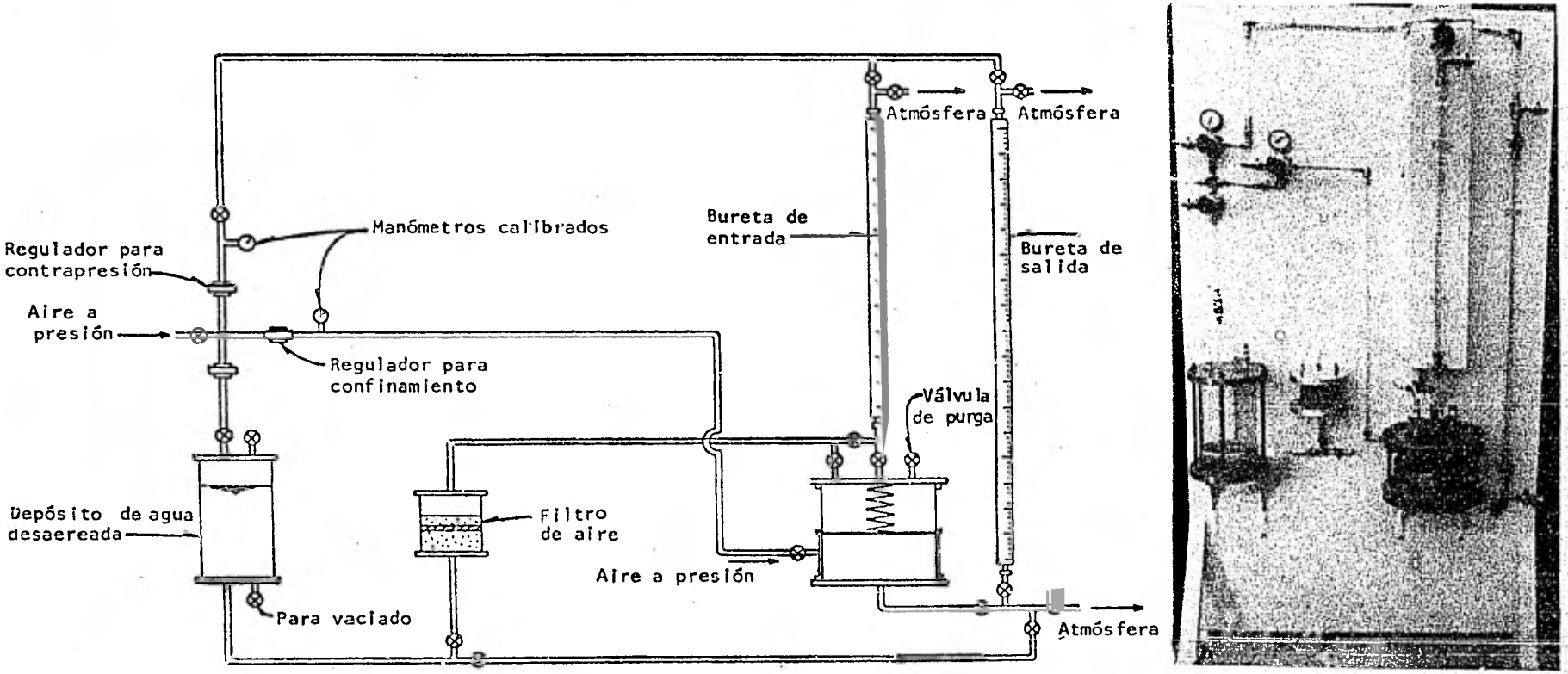


FIG 11 Sistema del permeámetro de carga variable diseñado en el Instituto de Ingeniería

- *Depósito de agua desaereada*

Es un recipiente de acrílico con dos tapas de fierro barnizadas para evitar que se oxiden, las cuales se unen mediante cuatro barras de acero y se sellan con el cilindro de acrílico con dos aro-sellos laterales. El propósito de este recipiente es almacenar agua previamente desaereada, que se utilizará para saturar el sistema y la muestra (fig 12).

- *Filtro de aire*

Es un recipiente semejante al anterior, con la diferencia de que es más pequeño y sus tapas son de aluminio (fig 13). Dentro de este filtro se colocan una pequeña pastilla del material que se ensayará, y dos capas de arena de Ottawa, con el fin de que el aire que pudiera contener el agua quede atrapado en la pastilla y con ello se logra una saturación más efectiva de la muestra.

Durante los ensayes se observó que aplicando contrapresión al espécimen y desaereando el agua, se obtienen grados de saturación aceptables, por lo que se prescindió de este filtro.

- *Permeámetro*

Está formado por dos tubos de acrílico que en cada extremo tienen adherido un anillo como refuerzo; dos tapas, también de acrílico, un anillo metálico, dos aros de refuerzo y seis barras que sirven para unir las tapas (fig 14). En el interior del recipiente, la muestra se confina lateralmente con una membrana de látex y aire a presión, y verticalmente con una placa de latón perforada y un

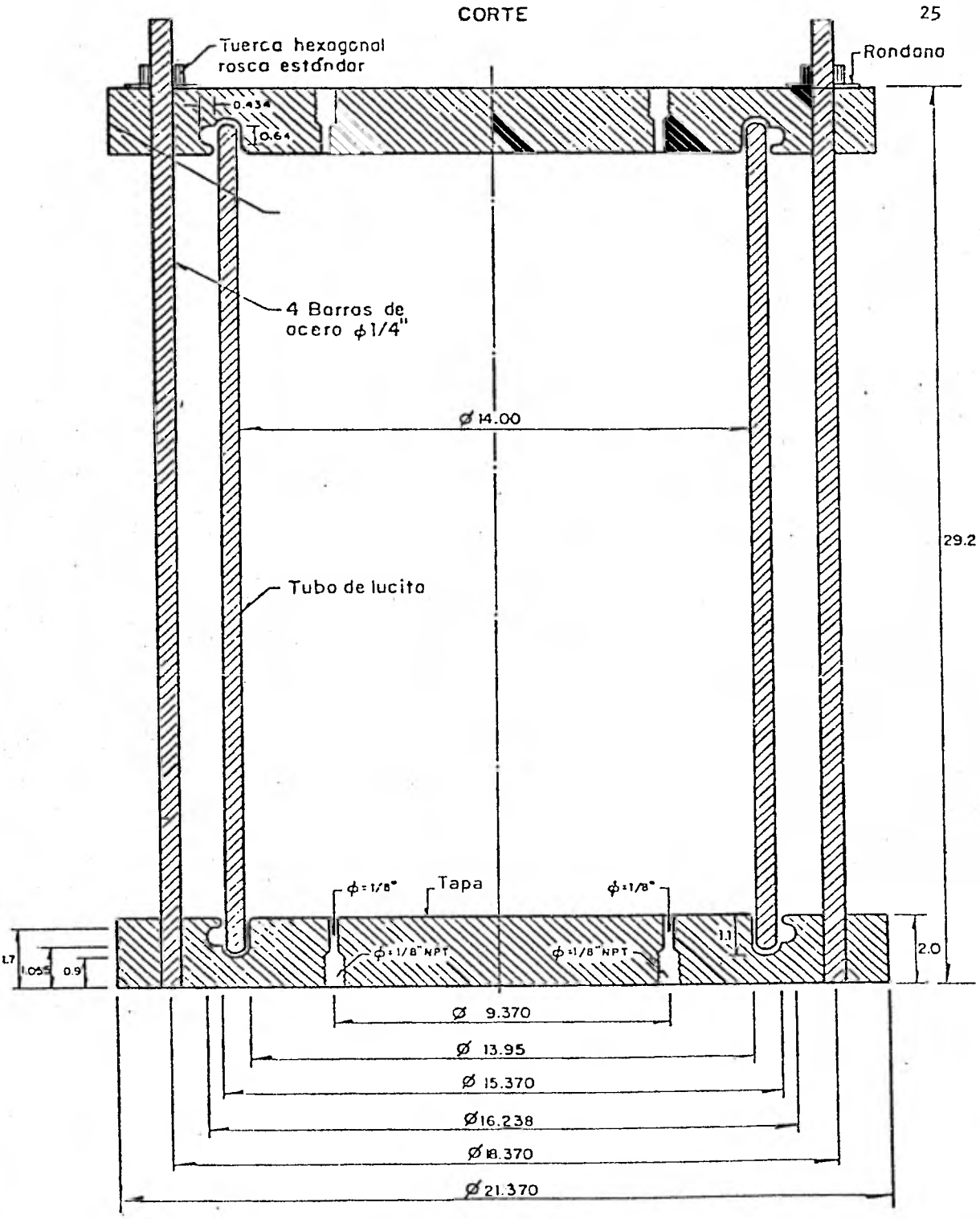


FIG 12 Depósito de agua desaereada (acotaciones, en cm)

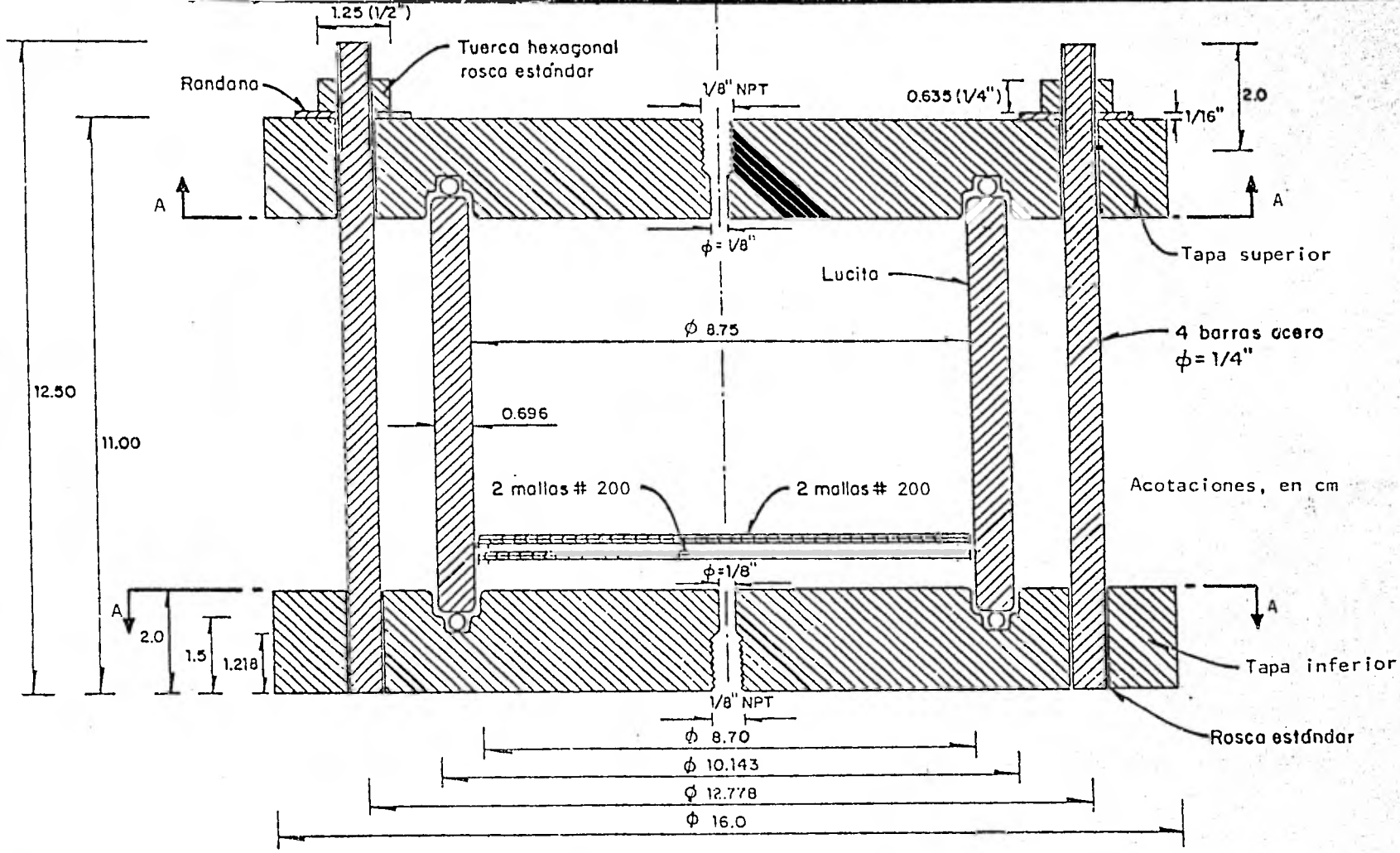


FIG 13 Filtro de aire

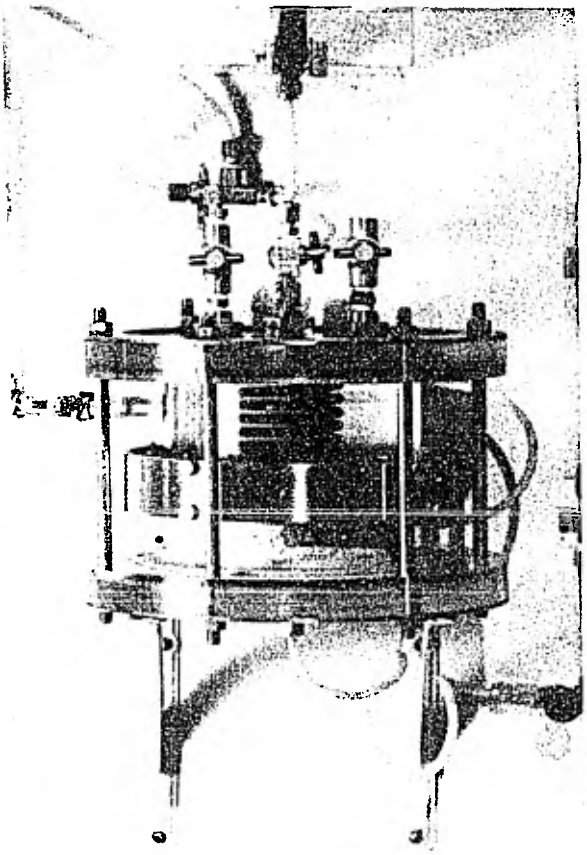


FIG 14 Permeámetro

resorte calibrado; la membrana es de 0.4 mm de espesor y la presión de aire que se aplica varía entre 50 y 100 kPa, por encima de la contrapresión. La presión que se aplica con el resorte es de aproximadamente 50 kPa, pero puede aumentarse colocando una capa de arena de Ottawa entre la placa de latón y la muestra. La curva de calibración del resorte se presenta en la fig 15.

- *Buretas*

El sistema cuenta con dos buretas; una a la entrada y otra a la salida, las cuales permiten conocer tanto el volumen que entra por la primera como el que sale en la segunda, y con ello verificar que la muestra ya no absorbe agua - cuando ambos son iguales. Este arreglo también permite medir la permeabilidad de la muestra de arriba hacia abajo o a la inversa, cambiando únicamente la posición de los niveles en las buretas.

En el apéndice II, se presentan los dibujos en detalle de todas las piezas que incluye el permeámetro.

3.3 *Preparación de las muestras*

3.3.1 Muestras compactadas

Para la compactación de las muestras se utilizó al principio el molde CBR, que tiene un diámetro un poco mayor que el del permeámetro, razón por la que había que labrarlas después de compactadas; para evitar este inconveniente se construyó el molde que se presenta en la fig 16 y que tiene el diámetro adecuado.

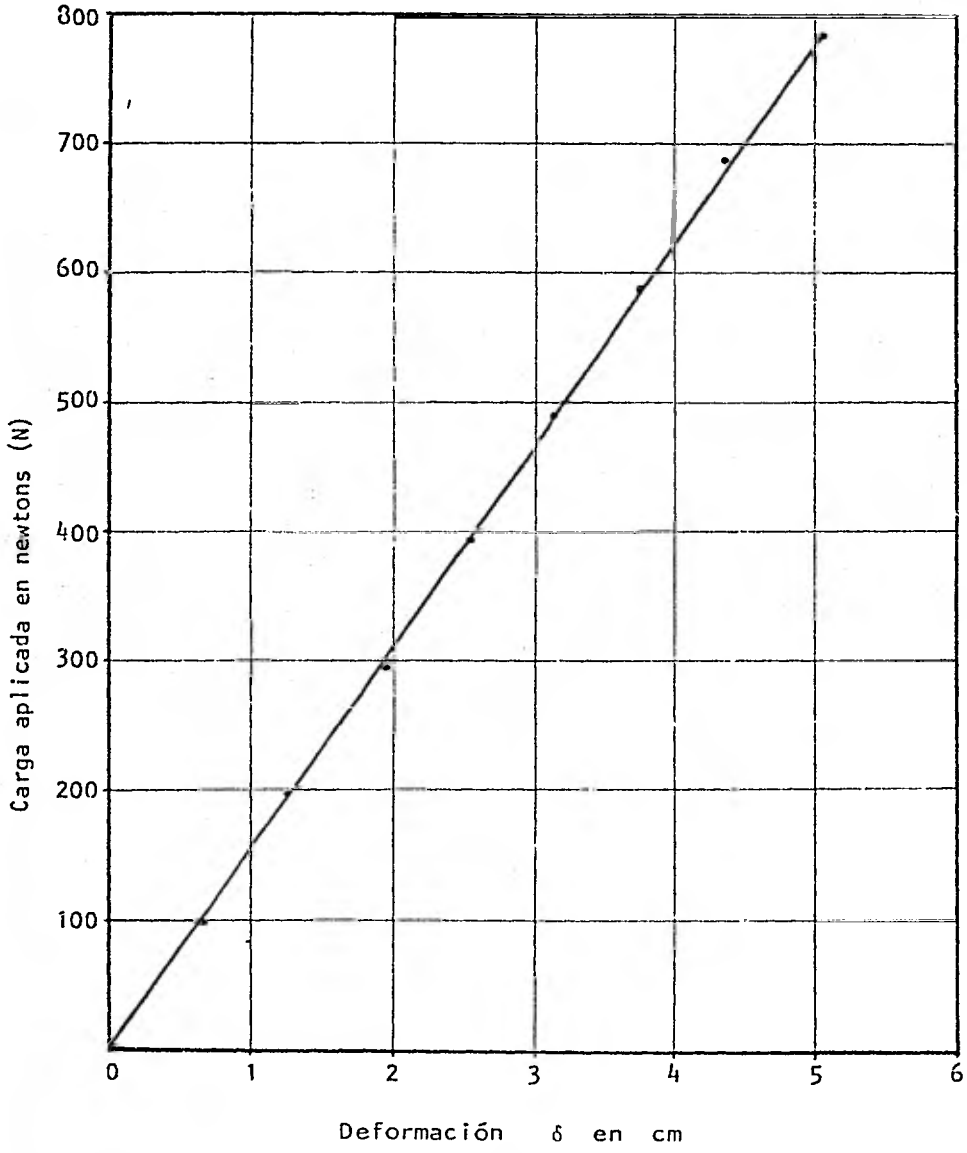


FIG 15 Curva de calibración del resorte

Acotaciones, en cm

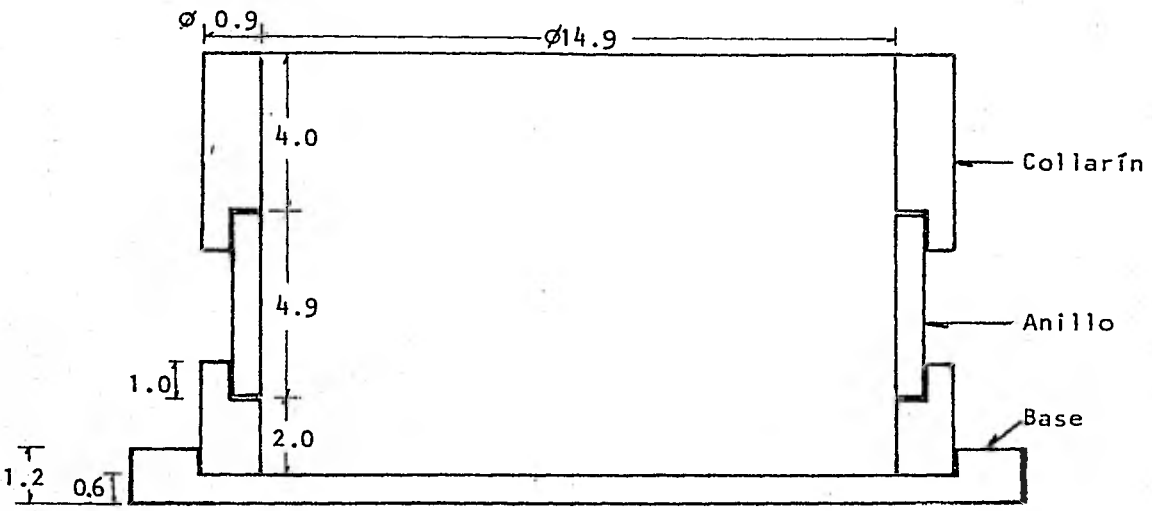


FIG 16 Molde de compactación para pruebas de permeabilidad

El martillo para compactar es el mismo que para las pruebas Próctor estándar. Se compacta en dos capas de igual espesor, con 54 golpes cada una, para dar una energía de 58.8 N cm/cm^3; la energía de compactación se obtiene como:

$$E_c = \frac{N\, n\, h\, W}{V} \qquad (9)$$

donde:

E_c energía específica, en N cm/cm^3

N número de golpes por capa

n número de capas

h altura de caida del martillo, en cm

W peso del martillo, en N

V volumen del suelo compactado, en cm^3

de tal manera que puede variarse de acuerdo con las condiciones que se quieran reproducir, cambiando el número de capas, de golpes por capa o el tipo de martillo.

Proceso de compactación

a) Se pesan aproximadamente 3 kg de material; conociendo su contenido natural de agua, se calcula la cantidad que hay que agregarle a fin de darle el contenido de agua de compactación deseado. Se extiende el material en una charola y con un atomizador se rocía el agua, revolviéndo el suelo constantemente con una espátula. Una vez agregada toda el agua, se coloca el suelo en una bolsa de polietileno y se cierra perfectamente. Se deja reposar el suelo un mínimo de 24 hr en cuarto húmedo, para que el contenido de agua sea homogéneo.

b) Se pesa la cantidad de suelo necesaria para cada capa, de modo que todas las capas compactadas sean del mismo espesor; para lograr mejor unión entre las capas debe escarificarse la superficie de la capa inferior compactada. En la compactación de las capas deben distribuirse los golpes de manera uniforme y cuidar que el nivel superior del material compactado sobresalga del anillo central del molde, un mínimo de 0.6 cm y como máximo 1.2 cm.

c) Con una espátula de cuchillo se despega el material adherido al collarín; girando suavemente el collarín, se retira del molde y con una regla metálica se enrasa el material. El sobrante del enrase se utiliza para sacar contenido de agua.

d) Se limpian el molde y la base, de modo que no lleven restos de material, y se pesan; conocido el peso del molde con la base, se obtiene el peso del suelo compactado, que dividido entre el volumen del molde da el peso volumétrico de la muestra.

e) Se retira el molde de la base y se invierte sobre el collarín, para evitar el remoldeo de la cara superior de la muestra; se despega el material que sobresale del anillo y girando suavemente la parte inferior del molde se retira, se vuelve a enrasar y a tomar muestras para contenidos de agua con los sobrantes. En las operaciones anteriores debe evitarse que la muestra pierda agua, para lo cual se recomienda trabajar en cuarto húmedo.

f) Se procede a la colocación de la muestra en el permeámetro.

3.3.2 Muestras cúbicas

Generalmente tienen de 20 a 40 cm de lado y están recubiertas con una capa de manta de cielo y una mezcla de parafina y brea. Para labrar las muestras que se utilizan en la prueba de permeabilidad, se debe trabajar en cuarto húmedo y con ello evitar que pierdan agua.

Proceso de labrado

a) Se retira el recubrimiento de la muestra; se nivela la parte superior con una regla metálica y se coloca el anillo central del molde de compactación, sobre la superficie.

b) Con la misma regla metálica se retira el material que sale a los lados del anillo, y con una cuchilla (fig 17) se retira el suelo que está inmediatamente abajo de las paredes del anillo; el anillo se presiona para lograr que la muestra penetre en él.

c) Una vez que la muestra sobresale del anillo, se enrasa la parte superior y se corta la inferior con la regla metálica; se invierte el anillo sobre el collarín y se vuelve a enrasar con la misma regla. El material que se retira de los enrases se utiliza para obtener contenidos de agua.

d) Se pesa el anillo con la muestra dentro, y restándole el peso del anillo se obtiene él de la muestra, que dividido entre el volumen que encierra el anillo da el peso volumétrico del espécimen.

e) Se procede a la colocación de la muestra en el permeámetro

3.4 *Proceso de prueba*

3.4.1 Equipo

a) Para desaerear el agua

- bomba de vacío
- matraz de 2 dm^3 de capacidad

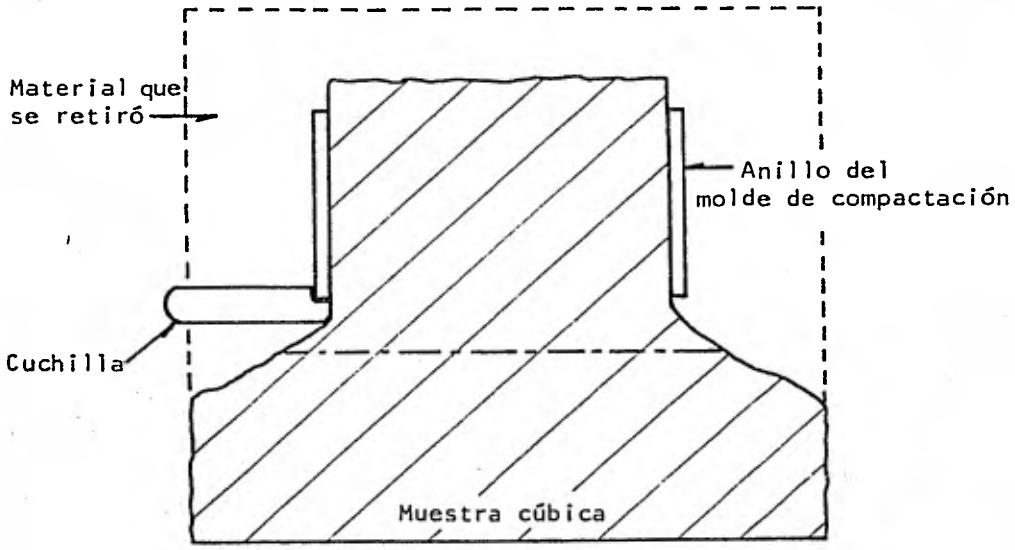


FIG 17 Esquema del labrado de un espécimen para prueba de permeabilidad, a partir de una muestra cúbica

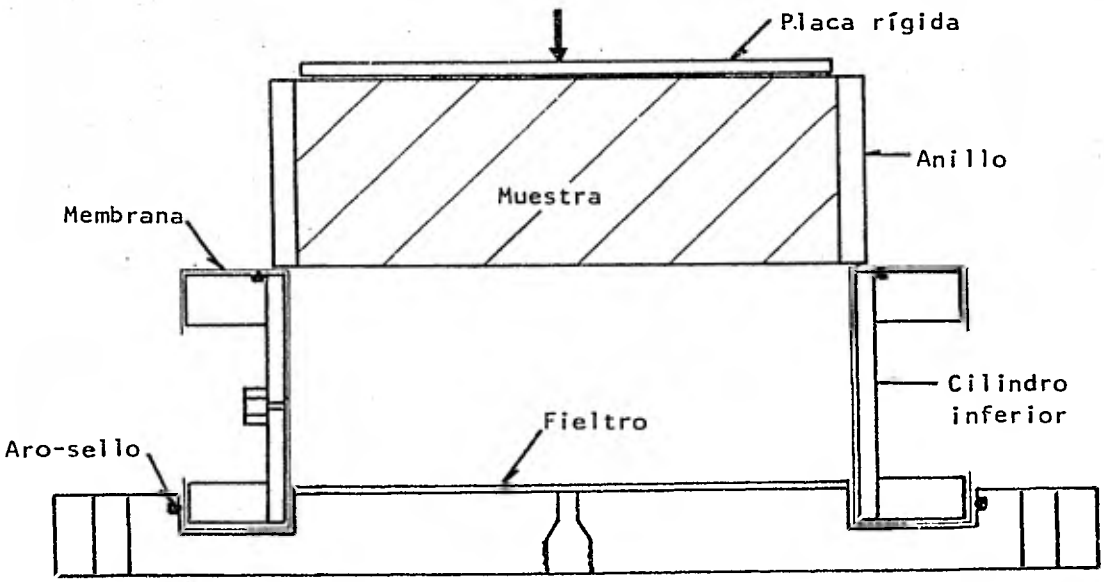


FIG 18 Esquema de la colocación de una muestra en el permeámetro

- mangueras de 1/4"

b) Para el permeámetro

- membrana de látex de 0.4 mm de espesor, 15 cm de diámetro y 10 cm de altura
- resorte calibrado
- placa de latón perforada de 14.9 cm de diámetro y 1/4" de espesor
- dos piezas de fieltro de 0.5 cm de espesor y 15 cm de diámetro

c) Equipo adicional

- termómetro
- cronómetro
- llaves para tuercas

3.4.2 Preparación del agua desaereada

El proceso que se sigue para desaerear el agua consiste en hervirla y dejarla enfriar hasta 50 o 60 °C; después, se tapa el matraz con un tapón de hule que lleva una manguera, con la cual se conecta a la bomba de vacío por espacio de aproximadamente 1 hora. El agua estará desaereada cuando al agitar el matraz ya no se formen burbújas. El agua así preparada deberá dejarse enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente, antes de vaciarla al depósito a través de una manguera, dejándola escurrir hasta el fondo, para evitar que vuelva a absorber aire.

3.4.3 Colocación de la muestra en el permeámetro

a) Se coloca la membrana en el cilindro inferior del perméametro y se acopla

a su tapa con el aro-sello puesto; una de las piezas de fieltro húmeda se pone en el fondo del recipiente.

b) El anillo con la muestra se coloca sobre el cilindro del permeámetro y en la parte superior del primero una placa rígida que sirve para empujar la muestra en el permeámetro (fig 18)

c) Estando la muestra dentro del permeámetro, se retiran anillo y placa; se coloca encima de la muestra la otra pieza de fieltro húmeda, la placa de latón perforada y el resorte calibrado.

d) Para cerrar el permeámetro se coloca el anillo de éste alrededor de su cilindro inferior, el cilindro superior con su tapa y los aros metálicos de ambas tapas; las barras se atornillan con sus tuercas y el anillo con sus tornillos, quedando armado como se indica en la fig 19.

e) Se lleva a instalar en el sistema.

3.4.4 Metodología del ensaye

Antes de iniciar el ensaye debe verificarse que todas las válvulas y los reguladores estén cerrados (fig 20).

A. Saturación del sistema

1) Se abren las válvulas 1 y 17; la primera alimenta el sistema con aire a presión y la segunda deja llegar la presión confinante a la membrana. Con el regulador RB se controla la presión de confinamiento, y se lee en el manómetro MB. La presión de confinamiento debe darse lentamente hasta alcanzar entre 50 y 100 kPA, dependiendo del tipo de suelo.

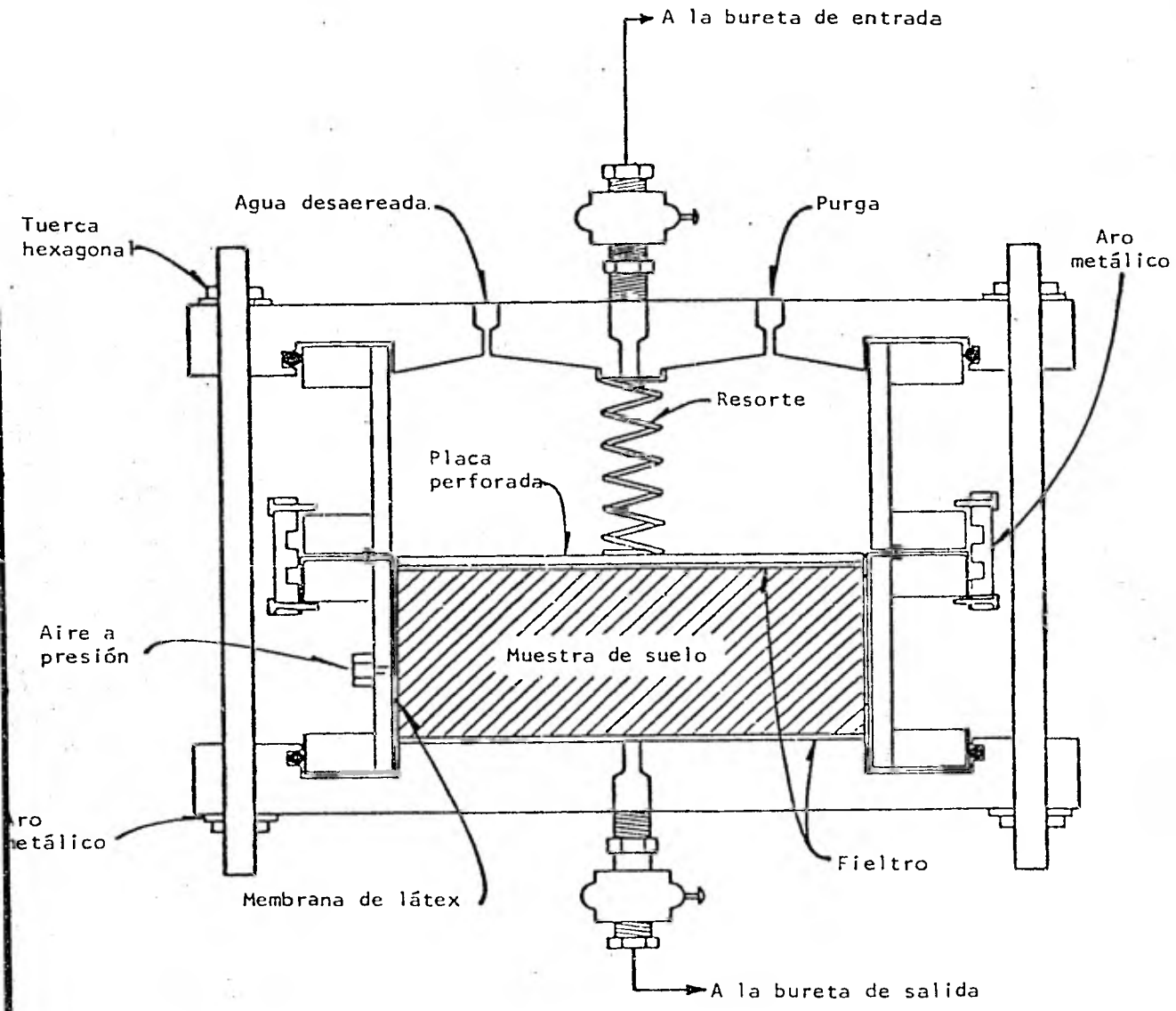


FIG 19 Permeámetro listo para colocarse en el sistema

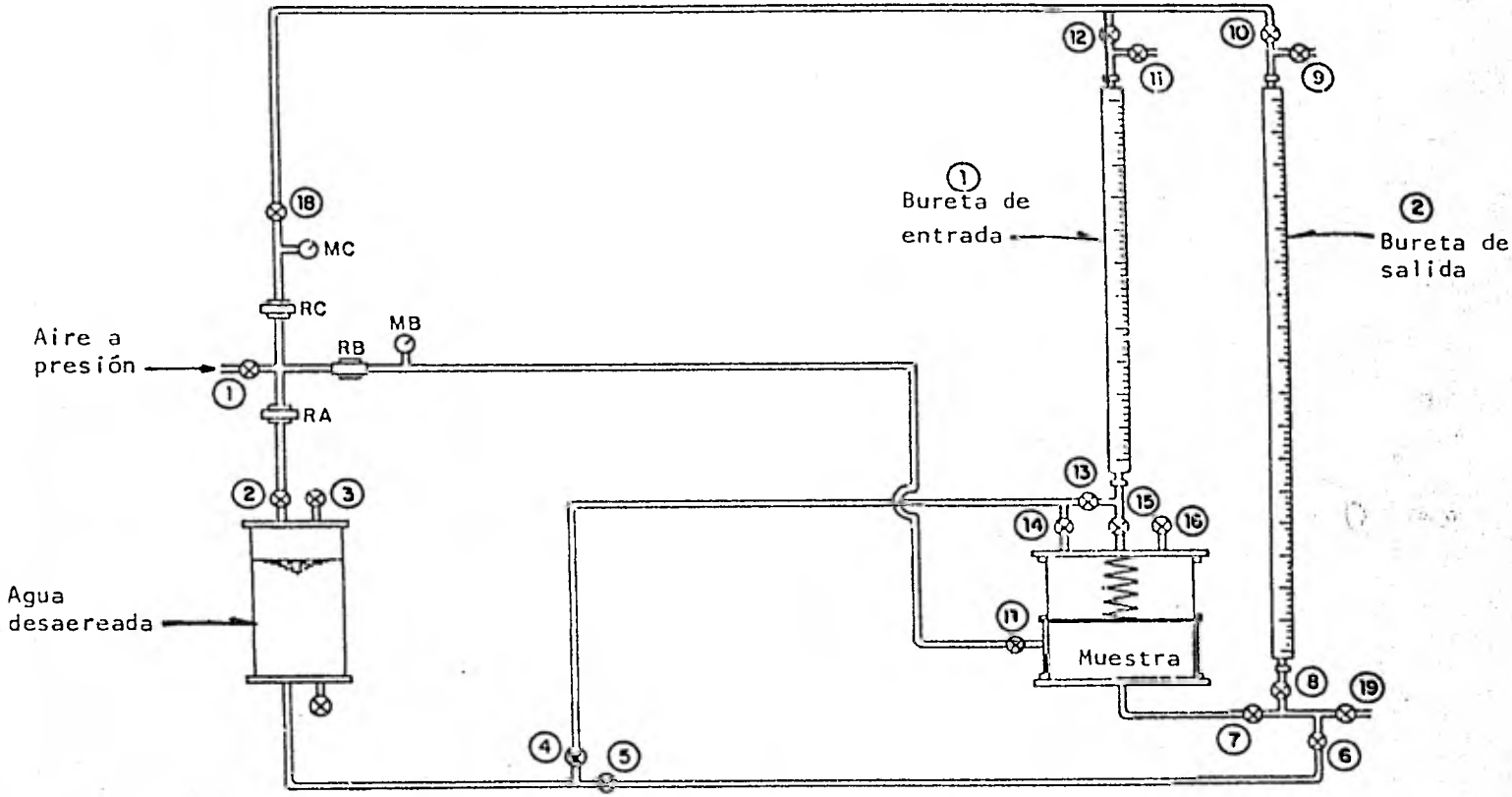


FIG 20 Numeración de válvulas y reguladores

2) Estando desconectada la manguera que llega al permeámetro por la parte inferior, se abren las válvulas 2, 5, 6 y 7. Con el regulador RA se controla la presión que llega al depósito de agua desaereada, y cuando comience a escurrir el agua por la manguera se conecta ésta al permeámetro. Se cierra la válvula 7 y se abren la 8 la 9; cuando el nivel de la bureta 2 suba a un poco más de la mitad, se cierran las válvulas 6, 8 y 9.

3) Se abren las válvulas 4, 11 y 13 hasta que el nivel en la bureta 1 éste en la parte superior; se cierran entonces la 11 y la 13.

4) Se abren las válvulas 14 y 16 para llenar el permeámetro, dejando escurrir suavemente el agua en su interior; cuando comience a salir agua por la válvula 16 deberán cerrarse la 14 y la 16.

B. Aplicación de la contrapresión

5) Se abren las válvulas 7, 8, 10, 12, 15 y 18, con los reguladores RB y RC se aplican incrementos iguales de presión, conservando la diferencia inicial dada en el punto 1, entre presión confinante y contrapresión. Se observará que los niveles en las buretas 1 y 2 bajan, debido sobre todo a la expansión del recipiente; como esta expansión es mayor que el volumen de agua que encierran las dos buretas no deben perderse de vista estos niveles.

6) Para llegar a la contrapresión deseada deberán subirse los niveles de las buretas tantas veces como sea necesario, de la manera siguiente: para la bureta 1 se cierran las válvulas 15 y 12 y se abren 11 y la 13; cuando

suba el agua al nivel requerido se cierran éstas dos últimas. Para la bureta 2 se cierran la 7 y la 10 y se abren la 9 y la 6; cuando se alcance el nivel deseado se cierran éstas dos últimas.

7) Se abren las válvulas 10, 12, 15 y 7 y se continúa dando los incrementos de presión. Al llegar a las presiones con las que se quiere trabajar, se deja saturando la muestra (el tiempo necesario para saturarla depende de su plasticidad), hasta llegar a la condición en la cual el volumen que entra por la bureta 1, es el que sale por la bureta 2. En esta última condición deben evitarse los cambios de temperatura en el sistema con el fin de efectuar las lecturas correctamente.

C. Ensaye

8) Para dar el gradiente deseado, los niveles de las buretas se ajustan como se indica en el punto 6, bajando o subiendo la presión en el depósito de agua desaereada con el regulador RA. Estando el sistema nuevamente en las condiciones señaladas en el punto 7, ya saturada la muestra, se cierran las válvulas 8 y 15 y se toman las lecturas de los niveles en las buretas; se abren las válvulas 8 y 15 al mismo tiempo en que se pone en marcha el cronómetro. Los datos de la prueba se anotan en la hoja de registro que aparece en la fig 21.

INSTITUTO DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS
PERMEABILIDAD CON CARGA VARIABLE

Muestra No. ———— Identificación de lab. ————
Procedencia ———— Profundidad ————
Localización ———— Fecha ————

DATOS INICIALES

Diam. del permeámetro ———— cm
Diam. de la muestra D ———— cm
Area de la muestra A ———— cm^2
Energía de compactación E_c ———— $\frac{N\ cm}{cm^3}$
G_s ———— γ_m ———— kN/m^3

Long de la muestra L ———— cm
Diam. de bureta D ———— cm
Area de bureta A ———— cm^2
$k = 2.3 \frac{aL}{\Delta t A} \log \frac{h_1}{h_2}$

Fecha	Hora	Δt	Presión confinante	Contra-presión	Nivel bureta 1	Nivel bureta 2	h_1 (cm)	h_2 (cm)	Temp. °C	k

OBSERVACIONES: ————

FIG 21 Hoja para registro

4. PRUEBAS

Con el permeámetro descrito en el capítulo anterior, se realizaron pruebas con diferentes suelos, los cuales se describen a continuación.

4.1 *Suelos plásticos*

4.1.1 Descripción de los materiales

Se ensayaron dos arcillas (CL) con objeto de conocer la variación de su coeficiente de permeabilidad, respecto al contenido de agua de compactación. Estas arcillas provienen de Río Escondido, Coah.; sus características se resumen en la tabla 2.

TABLA 2 Características de las arcillas ensayadas

Tipo de material	Descripción	Límites de Atterberg W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)	Densidad de sólidos	Clasificación SUCS*
I	Arcilla blanca** con grumos muy duros	31.3	20.5	10.8	2.69	CL
II	Arcilla gris oscuro orgánica con algunos grumos	39.0	22.1	16.9	2.66	CL

* Sistema unificado de clasificación de suelos

** Caliche

Para las pruebas, se utilizó la fracción de los materiales que pasó la malla de 3/4", preparándola para la compactación como se indica en 3.3.1 y dejándola reposar 7 días en cuarto húmedo.

4.1.2 Resultados

En la tabla 3 se presentan los datos de compactación, así como el contenido de agua y grado de saturación obtenidos al final de las pruebas de permeabilidad.

TABLA 3 Datos de las muestras de arcilla

Material	γ_d kN/m^3	w_c %	S_{r_i}	w_f %	S_{r_f}
I	17.88	11.35	0.642	16.43	0.929
	18.48	12.55	0.789	16.04	1.009
	18.40	13.95	0.865	15.22	0.944
	18.06	15.03	0.877	15.76	0.920
	15.48	20.16	0.770	22.84	0.872
II	14.94	13.56	0.483	24.50	0.873
	15.82	14.70	0.602	22.60	0.926
	16.22	17.20	0.751	21.40	0.934
	16.05	19.16	0.814	20.78	0.887
	15.75	20.17	0.818	—	—
	15.25	21.90	0.825	24.23	0.913

γ_d peso volumétrico seco

w_c contenido de agua de compactación

S_{r_i} grado de saturación de compactación

w_f contenido de agua al final de la prueba de permeabilidad

S_{r_f} grado de saturación al final de la prueba de permeabilidad

En la tabla 4, se presentan los resultados de las pruebas de permeabilidad efectuadas en cada una de las muestras con las que se construyeron las curvas de compactación.

TABLA 4 Resultados de las pruebas en arcillas

Tipo de material	γ_d kN/m^3	w_c %	Presión confinante MPa	Contra-presión MPa	k_{min}	k_{max}	k_{prom}
					m/s		
I	17.18	11.35	0.50	0.40	7.4×10^{-7}	8.2×10^{-7}	7.8×10^{-7}
	18.48	12.55	0.50	0.40	3.4×10^{-8}	4.2×10^{-8}	3.7×10^{-8}
	18.40	13.95	0.50	0.40	5.5×10^{-10}	8.8×10^{-9}	6.9×10^{-10}
	18.06	15.03	0.48	0.40	2.5×10^{-10}	4.3×10^{-10}	3.6×10^{-10}
	15.48	20.16	0.48	0.40	7.4×10^{-10}	1.7×10^{-9}	1.2×10^{-9}
II	14.94	13.56	0.50	0.40	2.5×10^{-7}	3.0×10^{-7}	2.6×10^{-7}
	15.82	14.70	0.55	0.45	6.4×10^{-8}	8.8×10^{-8}	7.5×10^{-8}
	16.22	17.20	0.55	0.45	2.7×10^{-9}	3.6×10^{-9}	3.1×10^{-9}
	16.05	19.16	0.55	0.45	3.7×10^{-10}	6.0×10^{-10}	4.6×10^{-10}
	15.75	20.17	0.55	0.45	3.0×10^{-10}	4.0×10^{-10}	3.6×10^{-10}
	15.25	21.90	0.55	0.45	2.2×10^{-10}	4.6×10^{-10}	3.6×10^{-10}

En las figuras 22 y 23 se presentan las curvas de compactación y contenido de agua de compactación vs permeabilidad, para los materiales tipo I y tipo II respectivamente. En estas figuras debe notarse la forma de las curvas de contenido de agua vs permeabilidad, que es la misma encontrada por Mitchell *et al* (fig 3) para la arcilla limosa que emplearon. En los ensayes se encontró que la permeabilidad mínima se presenta para un contenido de agua de compactación 4 y 5 por ciento mayor que el óptimo, en los materiales tipo I y II respectivamente.

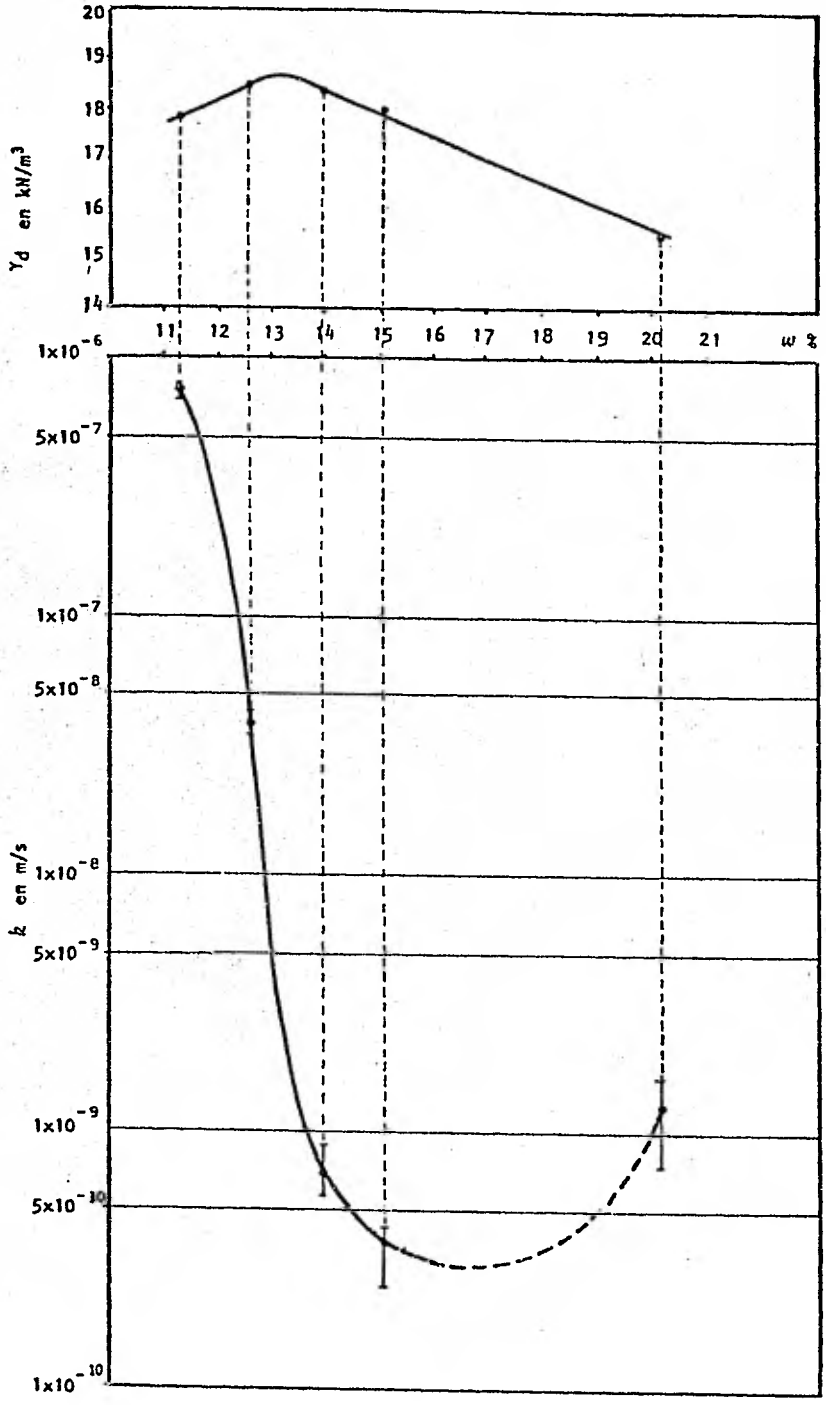


FIG 22 Curvas de compactación y permeabilidad del material tipo I

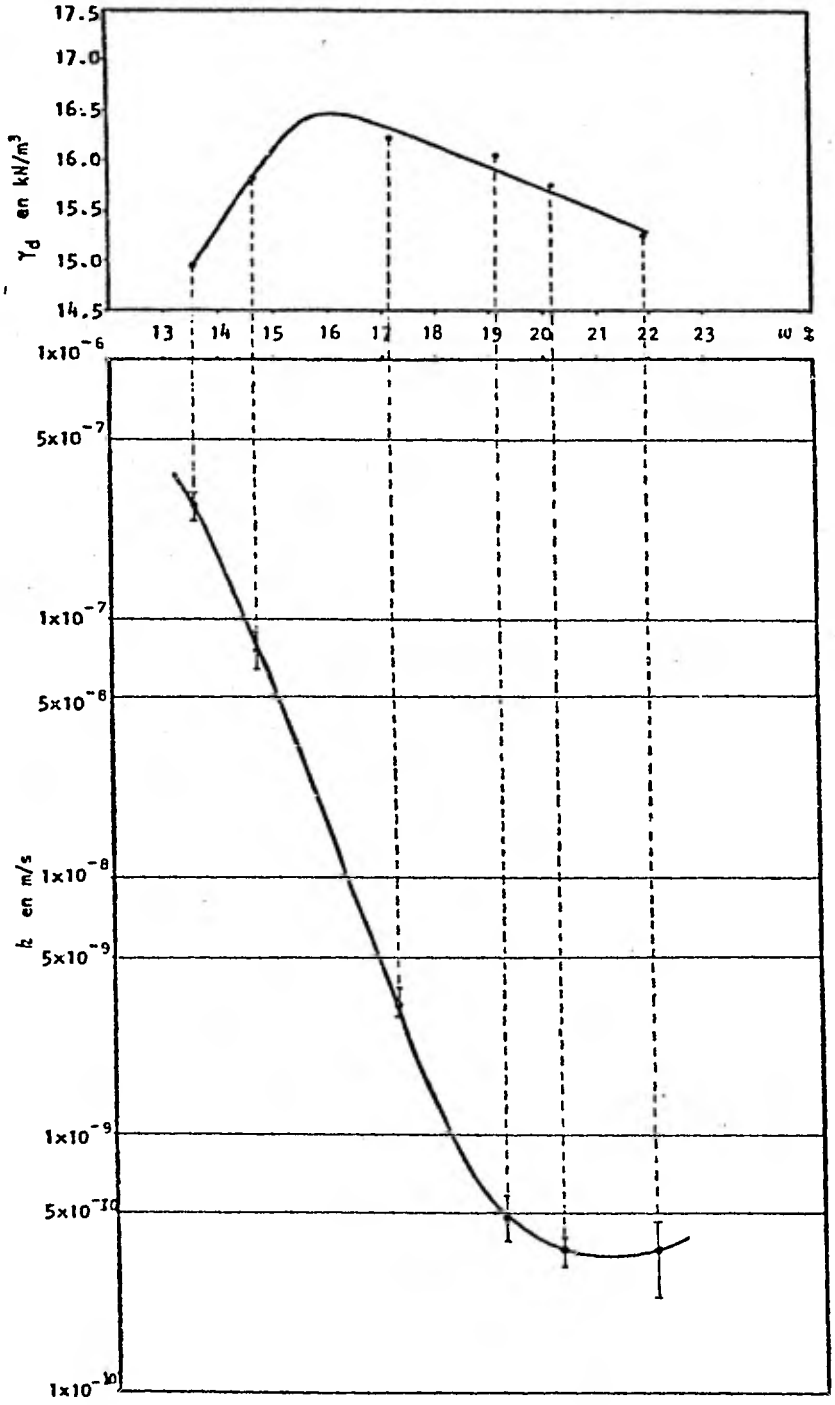


FIG 23 Curvas de compactación y permeabilidad del material tipo II

Durante las pruebas se observó que el coeficiente de permeabilidad presentaba una tendencia general a disminuir con el tiempo, principalmente en las muestras compactadas del lado seco; ésto se explica, por la inestabilidad que presentan sus estructuras al flujo, que provoca que algunas partículas sean arrastradas y taponen poros. En la fig 24 se presenta la gráfica de la variación de la permeabilidad con el tiempo para dos muestras con dos contenidos de agua de compactación diferentes; se hace notar que la reducción es más importante en la muestra compactada en la rama seca, debido al orden de magnitud en que se presenta.

4.1.3 Aplicación de los resultados

Con los resultados obtenidos con el permeámetro del Departamento de Estudios Experimentales de CFE, se dieron las especificaciones ($w_c = w_{opt} + 5\%$) para la impermeabilización de un estanque de almacenamiento de agua, las cuales se verificaron con los resultados resumidos en el punto anterior. El estudio se concluyó realizando algunos ensayes con muestras cúbicas traídas del sitio; un ejemplo típico de los resultados se presenta en la tabla 5 .

TABLA 5 Resultados de prueba en una muestra cúbica

Descripción	Clasif.	w_L	w_p	I_p	w_c	$k_{mín}$	$k_{máx}$	k_{prom}
		%				m/s		
Arcilla blanca con grumos (caliche)	CL	38.5	16.4	22.1	17.9	6.7×10^{-11}	2.5×10^{-10}	1.6×10^{-10}

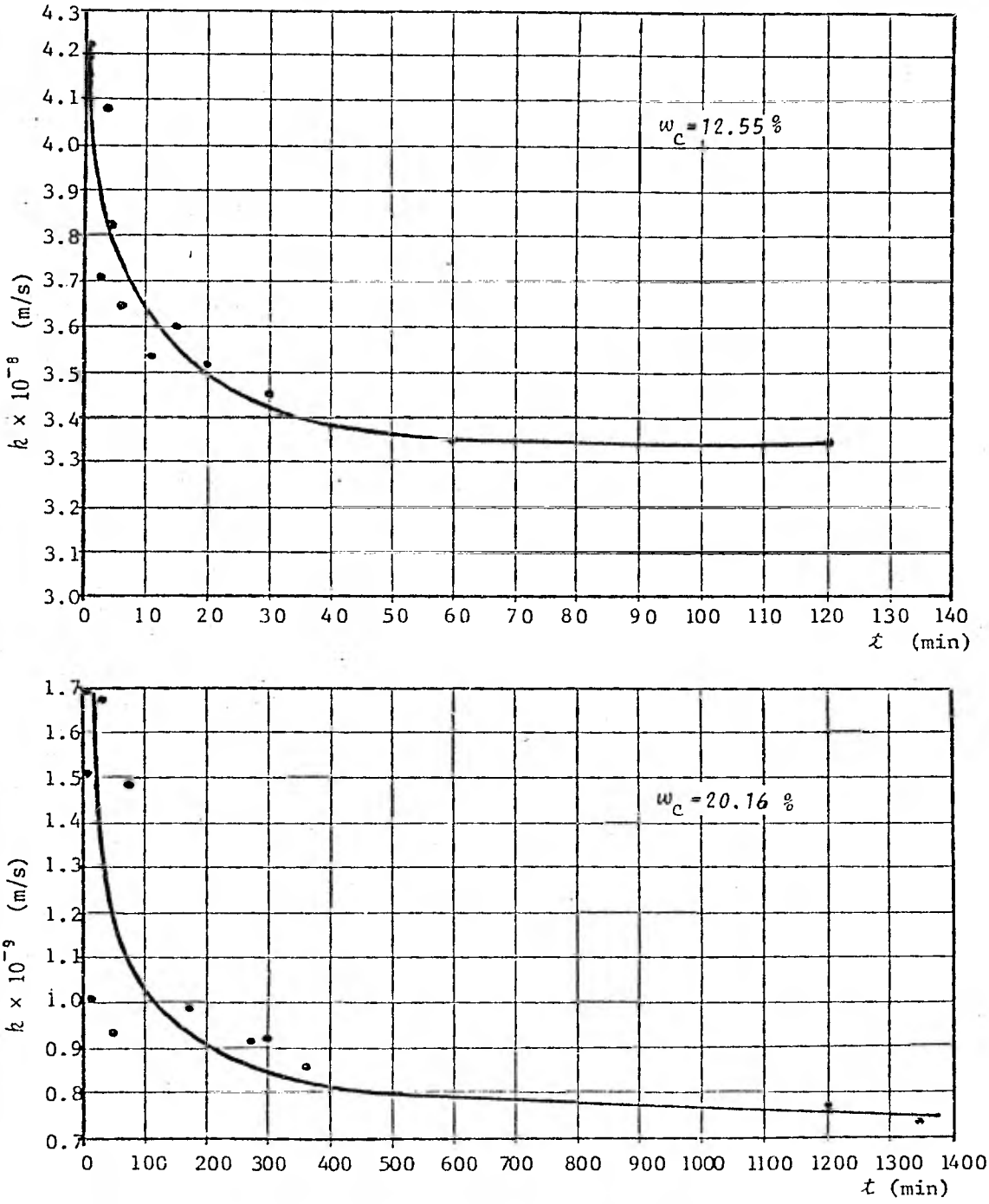


FIG 24 Variación del coeficiente de permeabilidad con el tiempo. Muestras del material tipo I

4.2 *Suelos no plásticos*

4.2.1 Descripción de los materiales

Se realizaron ensayes en tres tipos de suelo provenientes de Cerro Prieto, B.C., constituidos por sedimentos depositados en ambiente lacustre, cuyas características se resumen a continuación.

Material I Arena arcillosa café claro (SC), su fracción fina presentaba baja plasticidad, con densidad de sólidos $G_s = 2.64$

Material II Limo arenoso gris (ML) con densidad de sólidos $G_s = 2.64$

Material III Arena fina uniforme café claro (SP) con densidad de sólidos $G_s = 2.66$

En la fig 25 se presentan las curvas granulométricas correspondientes a la fracción gruesa de estos materiales.

4.2.2 Resultados

Los materiales se ensayaron en estado suelto y en estado denso, compactándolos en el permeámetro mismo, bajo diferentes contrapresiones; en la tabla 4 se resumen los resultados de las pruebas.

4.2.3 Aplicación de los resultados

Los tres materiales ensayados se escogieron como los más permeables de una zona en la que se construiría una laguna de evaporación (ref 2), para establecer las

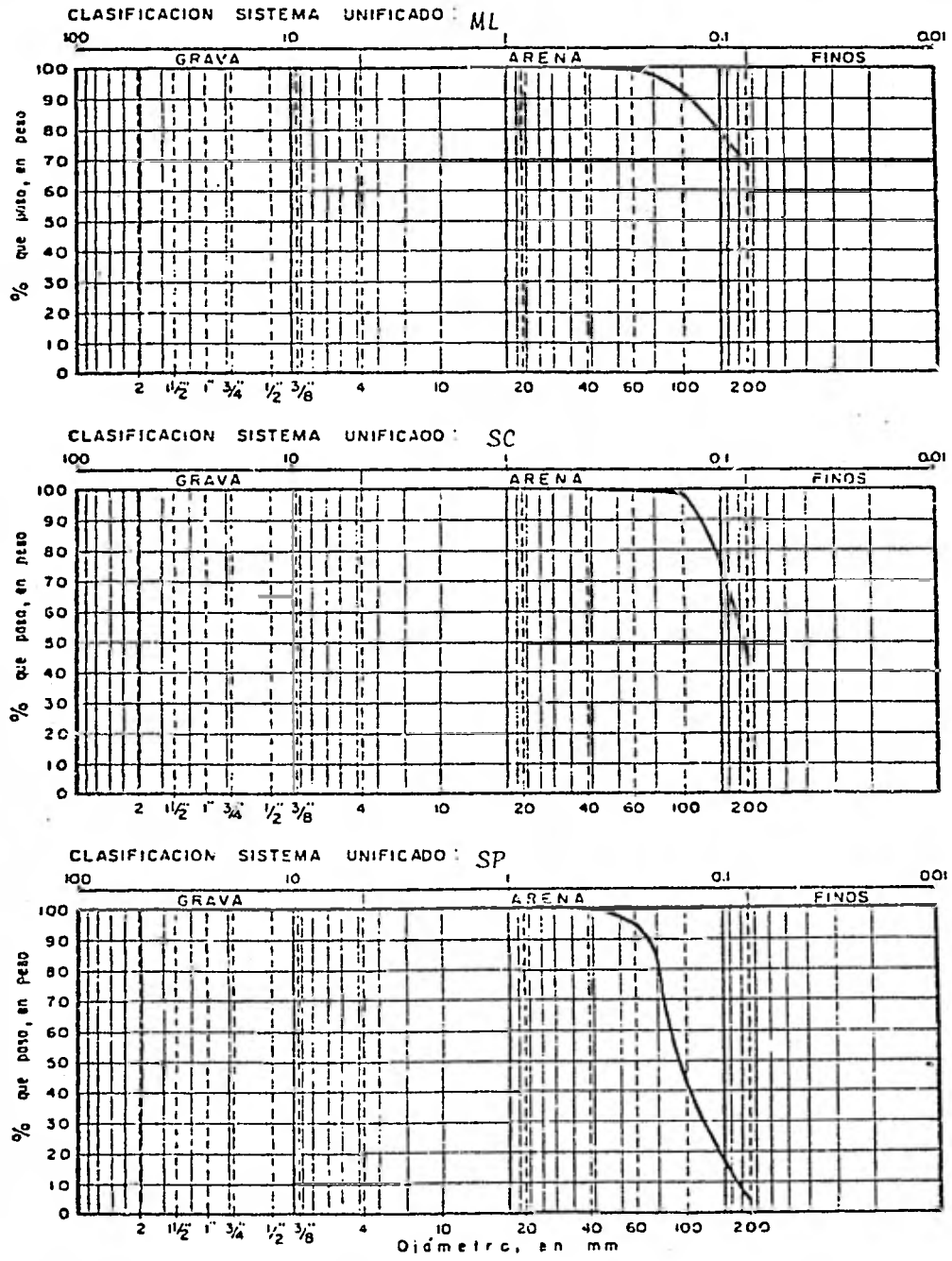


FIG 25 Curvas granulométricas de la fracción gruesa de los suelos ensayados

posibles filtraciones que se presentarían y con ello evaluar la necesidad de un revestimiento de arcilla compactada. Con este propósito se compararon los resultados de permeabilidad bajo condiciones controladas con los obtenidos en pruebas de campo; los datos encontrados permitieron concluir que el revestimiento no era necesario.

TABLA 4 Resultados de pruebas en suelos no plásticos

Material	γ_d kN/m^3	Contrapresión MPa	Coeficiente de permeabilidad m/s
Tipo I (SC)	14.07	0.15	4.50×10^{-6} a 9.48×10^{-6}
		0.30	6.29×10^{-6} a 1.31×10^{-5}
	16.54	0.15 *	8.20×10^{-6} a 1.00×10^{-5}
		0.30 *	1.49×10^{-5} a 2.34×10^{-5}
Tipo II (ML)	14.80	0.15	9.05×10^{-7} a 1.04×10^{-6}
		0.30	1.43×10^{-6} a 1.62×10^{-6}
	17.44	0.10	3.92×10^{-7} a 5.20×10^{-7}
Tipo III (SP)	14.76	0.10	1.37×10^{-5} a 1.85×10^{-5}
		0.20	1.71×10^{-5} a 2.39×10^{-5}
		0.30	1.78×10^{-5} a 2.44×10^{-5}
	16.54	0.15 *	1.72×10^{-5} a 2.85×10^{-5}
		0.30 *	1.48×10^{-5} a 2.34×10^{-5}

* se presentó segregación de finos durante la prueba

4.3 *Evaluación del permeámetro*

En los ensayes de permeabilidad deben tenerse en cuenta dos aspectos fundamentales, que son las características de la muestra y las del aparato. A continuación se comentan estos aspectos haciendo énfasis en los puntos que más influyen en los resultados de una prueba realizada con el permeámetro descrito en el capítulo anterior, así como algunas modificaciones para mejorar el aparato.

4.3.1 Presiones confinantes

La presión lateral necesaria para garantizar el sello es función de la consistencia de la muestra (labrada o compactada, suave o firme) y del estado de esfuerzos con que se realizará el ensaye. En las muestras labradas es necesario aplicar una presión confinante mayor sobre la membrana, ya que su superficie lateral es más rugosa; durante las pruebas se observó que la presión mínima necesaria era de 50 kPa y 100 kPa mayor que la contrapresión, para muestras compactadas y labradas respectivamente.

Cuando se ensayan muestras blandas se debe evitar que la presión lateral aplicada provoque su extrusión; en los materiales utilizados se encontró que la presión máxima aplicable a especímenes con esta consistencia era de 50 kPa por encima de la contrapresión.

En algunos casos el confinamiento lateral y axial de la muestra provocará cierta consolidación, que puede no ser representativa de las condiciones a las que estará sujeto el suelo en la realidad; este inconveniente puede salvarse si se

escogen presiones confinantes adecuadas, ya sea cambiando el resorte o la presión en la membrana, o bien compactando el suelo en el recipiente de prueba.

4.3.2 Grado de saturación de los especímenes

Los grados de saturación medidos después de los ensayes son menores que los que se tienen durante las pruebas, ya que al obtenerlos se ha dejado de aplicar la contrapresión a la muestra, permitiendo la expansión del aire atrapado en sus poros. En los suelos ensayados se midieron valores entre 87 y 100 por ciento, que pueden considerarse aceptables; sin embargo, este intervalo puede mejorarse si se coloca una interfase de aceite igual en cada bureta, para separar el agua del aire. Además, es conveniente proporcionar la presión confinante con agua, ya que en general las membranas son más permeables al aire que al agua.

4.3.3 Arrastre de partículas

La aplicación de gradientes grandes puede provocar el arrastre de partículas, principalmente en los suelos no plásticos; para evitar este problema es necesario aplicar gradientes muy bajos e irlos incrementando lentamente hasta un valor máximo, que dependerá del tipo de suelo (arena fina, limo, etc).

4.3.4 Precisión de las lecturas

a) En las buretas

La precisión de las lecturas de nivel en las buretas es función de la magnitud de la permeabilidad del espécimen que se ensaya, siendo mayor (hasta 0.05

cm) para suelos muy poco permeables y menor (hasta 0.2 cm) para los suelos más permeables como arenas finas, arenas limosas y limos.

b) En los manómetros

La precisión de los manómetros de los reguladores es de 10 kPa, la cual puede aumentarse si se sustituyen éstos por manómetros de mercurio o por transductores conectados a un puente de Wheatstone.

4.3.5 Dilatación del sistema

Si durante el ensaye se presentan variaciones notables de temperatura, la dilatación o contracción del permeámetro provocará cambios en los niveles de las buretas, sobre todo en la de entrada. El problema disminuirá reduciendo la altura del cilindro superior del permeámetro y con ello también el volumen de agua; asimismo, puede cambiarse el material del permeámetro (acrílico de $\alpha = 70$ *), por otro menos susceptible a los cambios de temperatura, como el acero ($\alpha = 11.5$) o el aluminio ($\alpha = 22.4$).

* α es el coeficiente de dilatación térmica lineal, en $10^{-6}\ °C^{-1}$

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un permeámetro de carga variable con el fin de determinar de una manera más confiable el coeficiente de permeabilidad de los suelos finos; con base en este desarrollo y en la serie de pruebas realizadas, tanto en suelos plásticos como no plásticos, se llegó a las conclusiones siguientes:

- Se demostró que es posible medir con razonable precisión coeficientes de permeabilidad hasta del orden de 10^{-10} m/s , sin tener que recurrir a la prueba de consolidación.

- Se confirmaron los resultados obtenidos por Mitchell, en el sentido de que con una diferencia relativamente pequeña en el contenido de agua de compactación, cercano al óptimo, se alcanzan reducciones en el coeficiente de permeabilidad hasta de tres ordenes de magnitud (figs 3, 22 y 23). Hecho que es de pri

mordial importancia en aquellas obras donde la permeabilidad es el factor determinante en el diseño.

- Se puso en evidencia la reducción que sufre el coeficiente de permeabilidad con el tiempo, debido a la migración de partículas y a otras alteraciones en la estructura del suelo, llegando a presentarse diferencias hasta de más del 50 por ciento, aún en suelos arcillosos.

- Se presentó arrastre de finos durante algunas pruebas realizadas en suelos no plásticos, lo cual muestra la importancia de efectuar los ensayes aplicando los gradientes probables de trabajo, y con ello poder prevenir la presencia de este fenómeno en la obra.

- Se pudo comprobar que los resultados de laboratorio coinciden de manera aceptable con los de campo y que el efecto de escala no es apreciable, al poderse considerar la muestra de laboratorio como representativa de las propiedades y condiciones del suelo en el campo, si se siguen procedimientos adecuados de construcción (ref 1) y de análisis.

- Se observó durante los ensayes que el permeámetro tiene un funcionamiento adecuado; aunque, puede mejorarse en aspectos tales como presiones confinantes aplicadas, saturación de las muestras, precisión de las lecturas y dilatación del permeámetro.

REFERENCIAS

1. Auvinet, G. y Espinosa, J. (1979), "*Compactation of clay linings for impermeabilization of reservoirs*". Memorias del VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Lima, Perú.

2. Auvinet, G., Zavala, J. y Gutiérrez, E. (1980), "*Laguna de evaporación de Cerro Prieto, B.C.. Estudio de factibilidad*". Reporte del Instituto de Ingeniería a CFE

3. CFE (1979), Reporte interno del Departamento de Estudios Experimentales No. 345-367-79 (AGHCO).

4. Hillel, D. (1971), "*Soil and water: physical principles and processes*". Academic Press, New York.

5. Juárez, E. y Rico, A. (1975), "*Fundamentos de la mecánica de suelos*". Mecánica de Suelos, Tomo I. Edit. Limusa.

6. Lambe, W. y Whitman, R. (1972), "*Mecánica de suelos*". Traducción del prof. Jiménez Salas. Edit. Limusa.

7. Marsal, R. J. (1976), "*Análisis de conocimientos sobre suelos cohesivos compactados*", Memorias del VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Lima, Perú.

8. Marsal, R., Alberro, J., Mendoza, M. y Nader, F. (1979), "*Segundo informe de suelos compactados*". Reporte del Instituto de Ingeniería a SAHOP.

9. Mitchell, K., Hooper, R. and Campanella, G. (1965), "*Permeability of compacted clay*". ASCE. Journal of the soil mechanics and foundation division.

10. Romo, M. y Yánes, M. (1979), "*Investigación sobre el desarrollo de succión en suelos no saturados*". Reporte del Instituto de Ingeniería a SAHOP.

A P E N D I C E I

(Equivalencias)

EQUIVALENCIAS

Para convertir de	a	multiplicar por
libra (lb)	kilogramo (kg)	0.454
libra/pie^3 (lb/ft^3)	kilogramo/metro^3 (kg/m^3)	16.02
kilogramo fuerza (kgf)	newton (N)	9.81
kilogramo fuerza/centímetro^2 (kgf/cm^2)	pascal (Pa)	9.81×10^4
kilogramo fuerza/metro^3 (kgf/m^3)	newton/metro^3 (N/m^3)	9.81
pie (ft)	metro (m)	0.305
poiseuille (Pl)	pascal × segundo (Pa × s)	1.0
pulgada (in)	metro (m)	0.0254

A P E N D I C E I I

(Dibujos de detalle del permeámetro)

Depósito de agua desaereada
Material: Fierro
Acotaciones, en cm

Nota: La tapa superior no lleva rosca

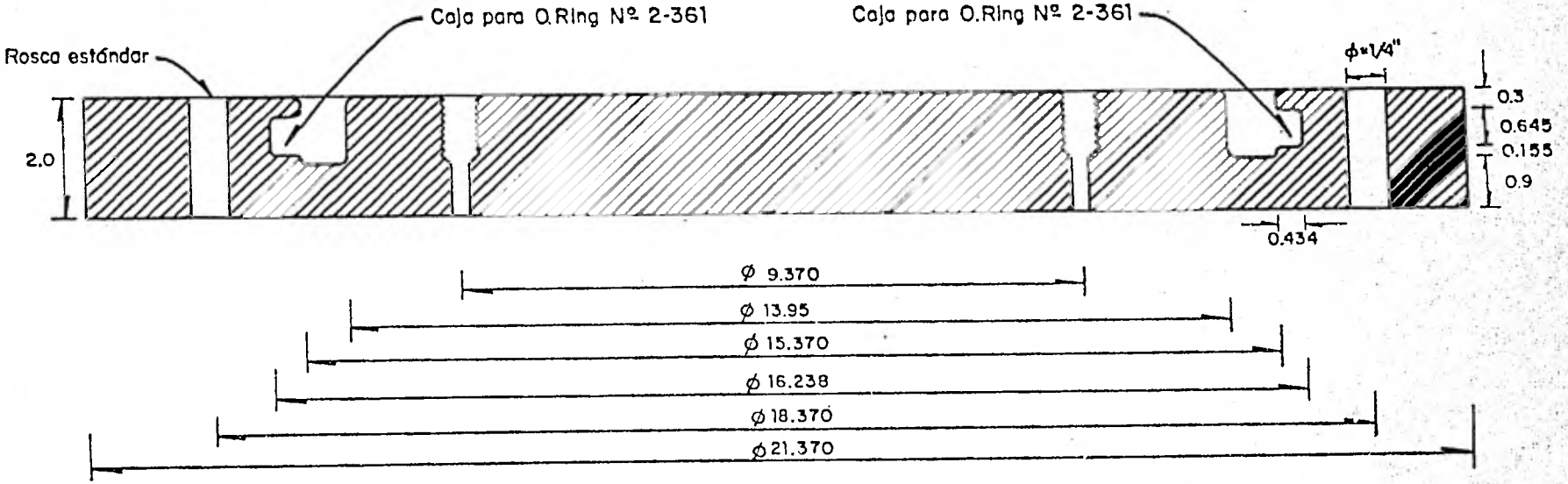


FIG 1.1 Tapas del depósito de agua desaereada (fig 12)

Nota: La tapa superior no lleva rosca

Filtro de aire
Material: Aluminio
Acotaciones, en cm

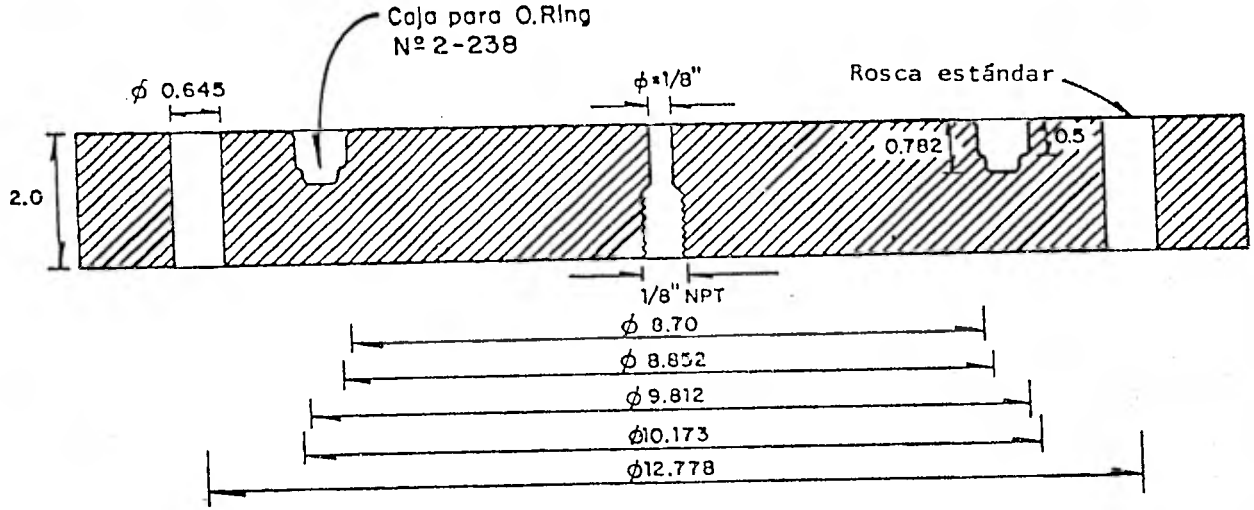


FIG 1.2 Tapas del filtro de aire (fig 13)

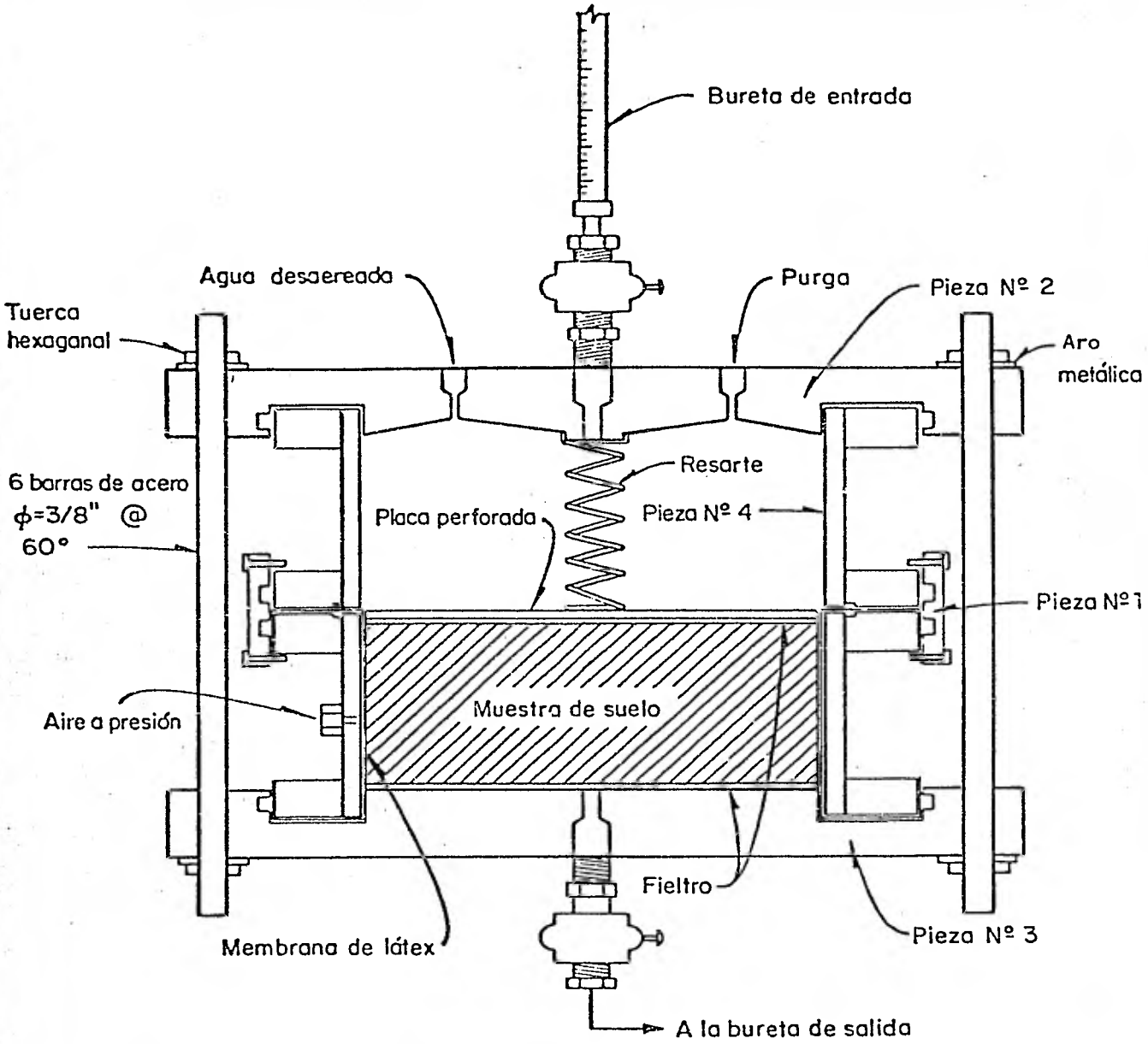
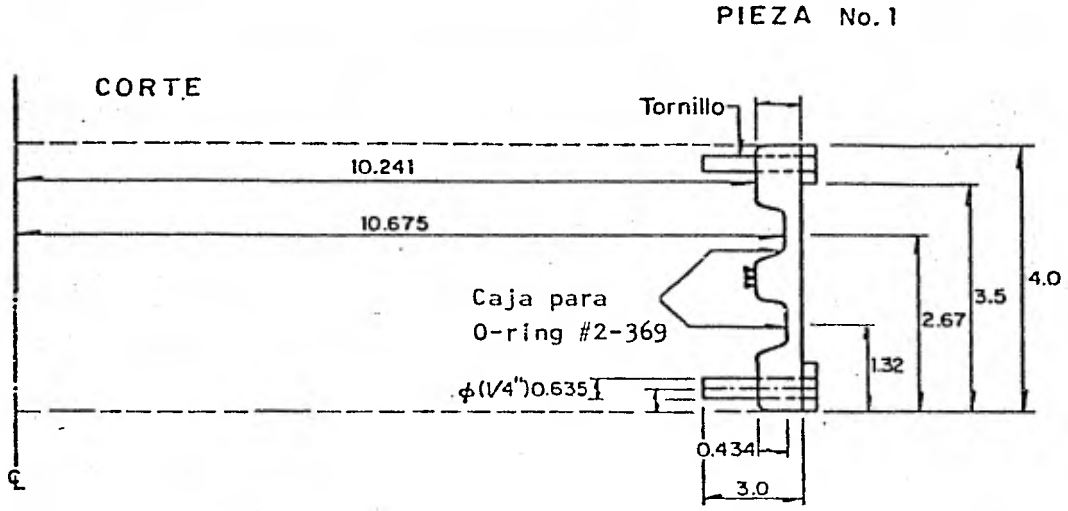
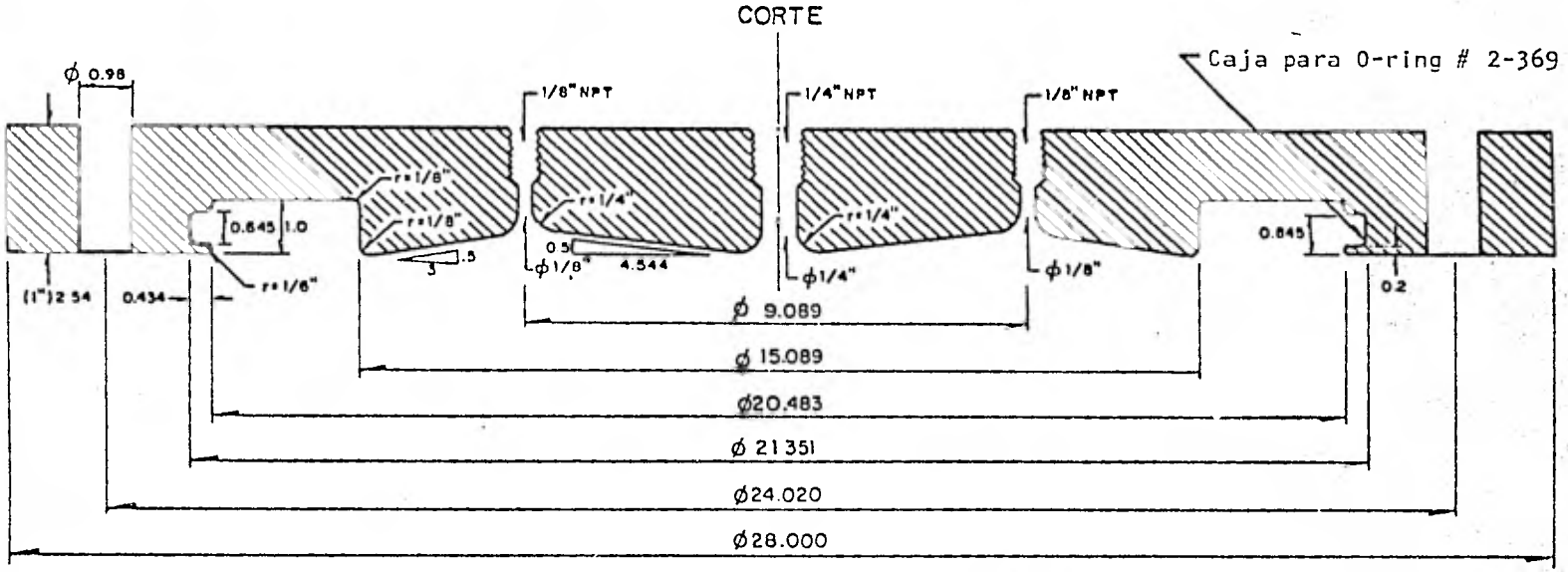


FIG 1.3 Esquema del permeámetro



Permeámetro carga variable
Material: Aluminio
Acotaciones, en cm

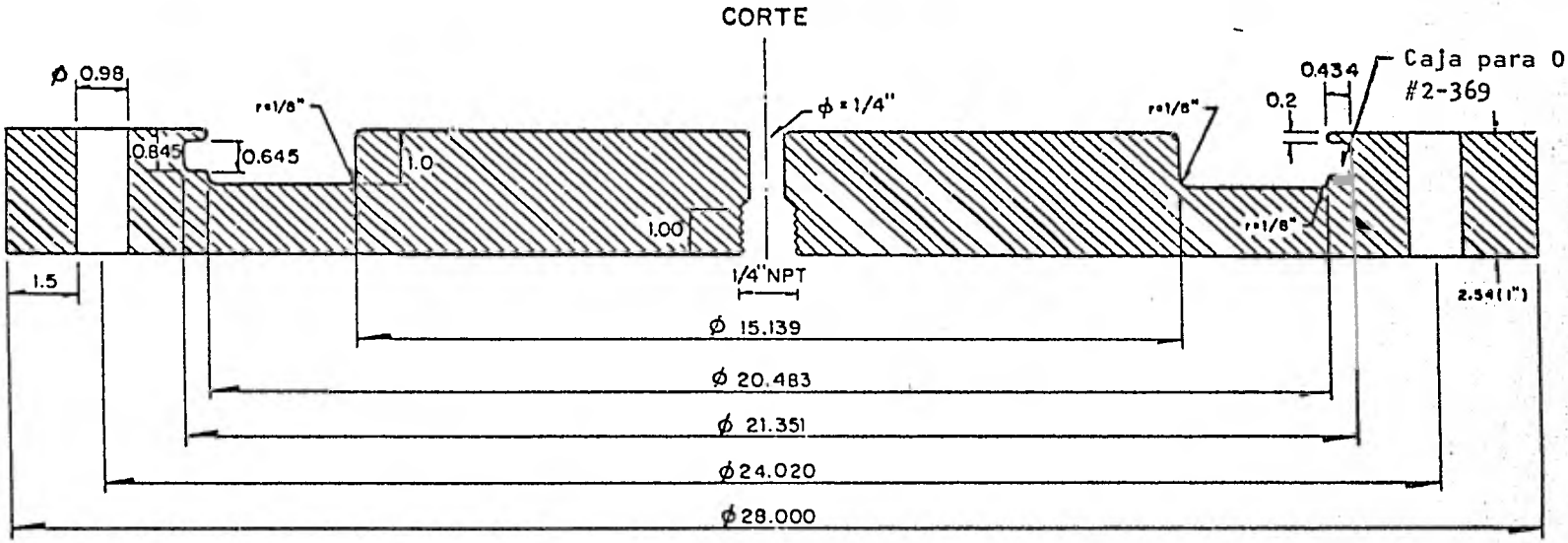
FIG 1.3.a Anillo metálico del permeámetro



Permeámetro carga variable
Material: Lucita
Acotaciones, en cm

PIEZA No. 2

FIG 1.3.b Tapa superior

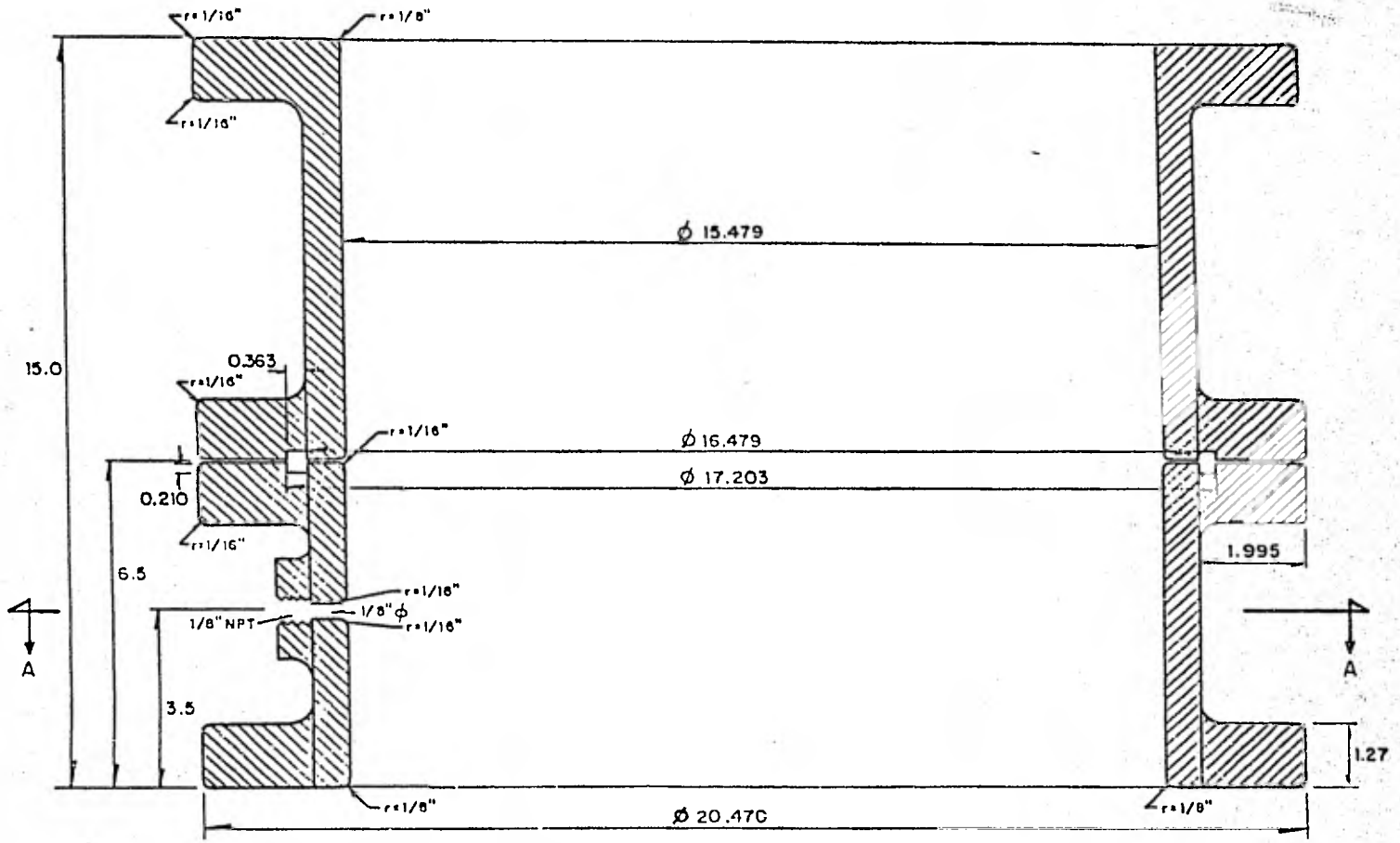


Permeámetro carga variable
Material: Lucita
Acotaciones, en cm

Pieza No. 3

FIG 1.3.c Tapa inferior

Permeámetro carga variable
Material: Lucita
Acotaciones, en cm



CORTE LONGITUDINAL

PIEZA No. 4

FIG 1.3.d.1 Cilindros superior e inferior

Permeámetro carga variable
Material: Lucita
Acotaciones, en cm

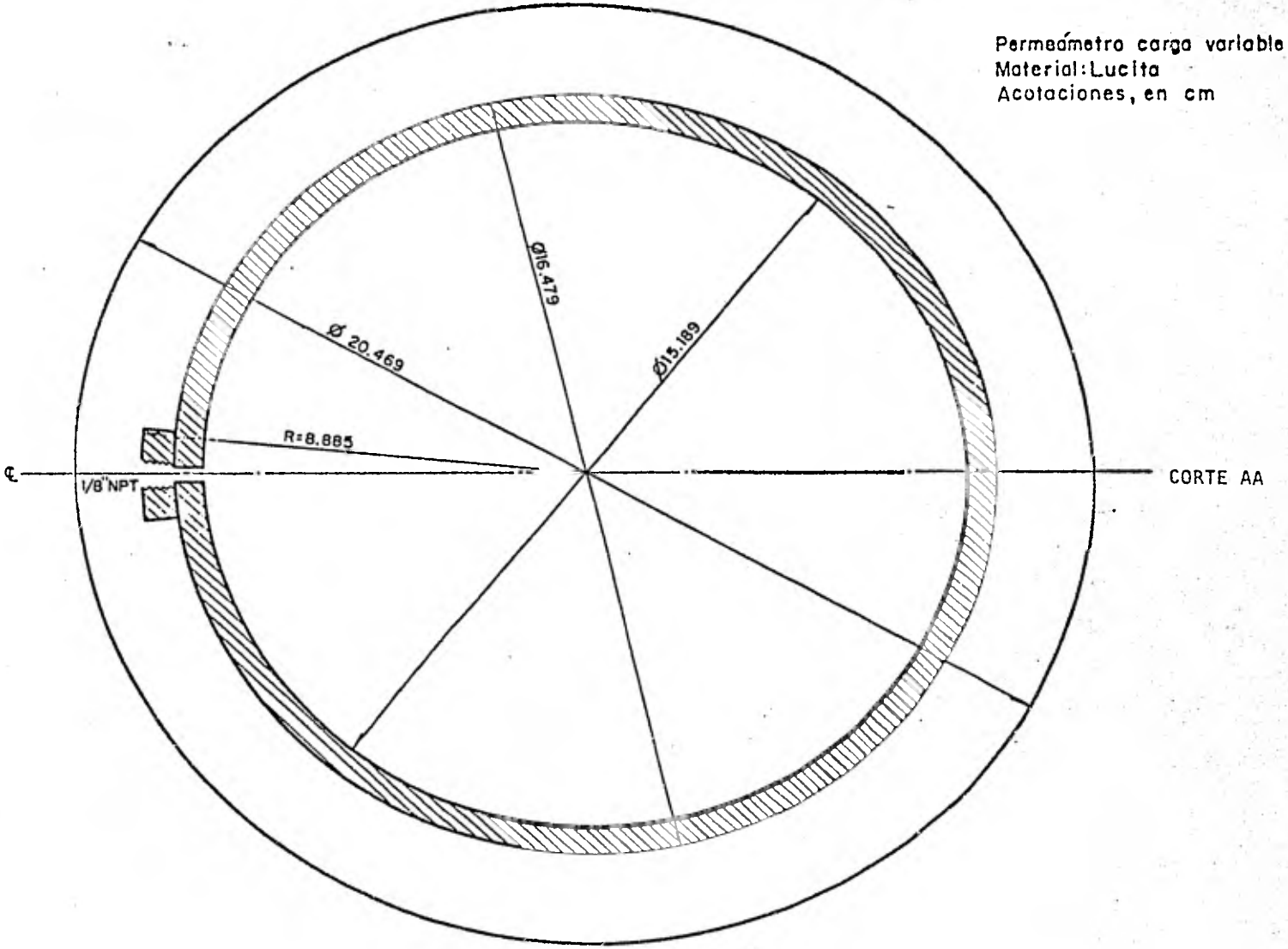


FIG 1.3.d.2 Ciiindro inferior en planta

PIEZA No 4

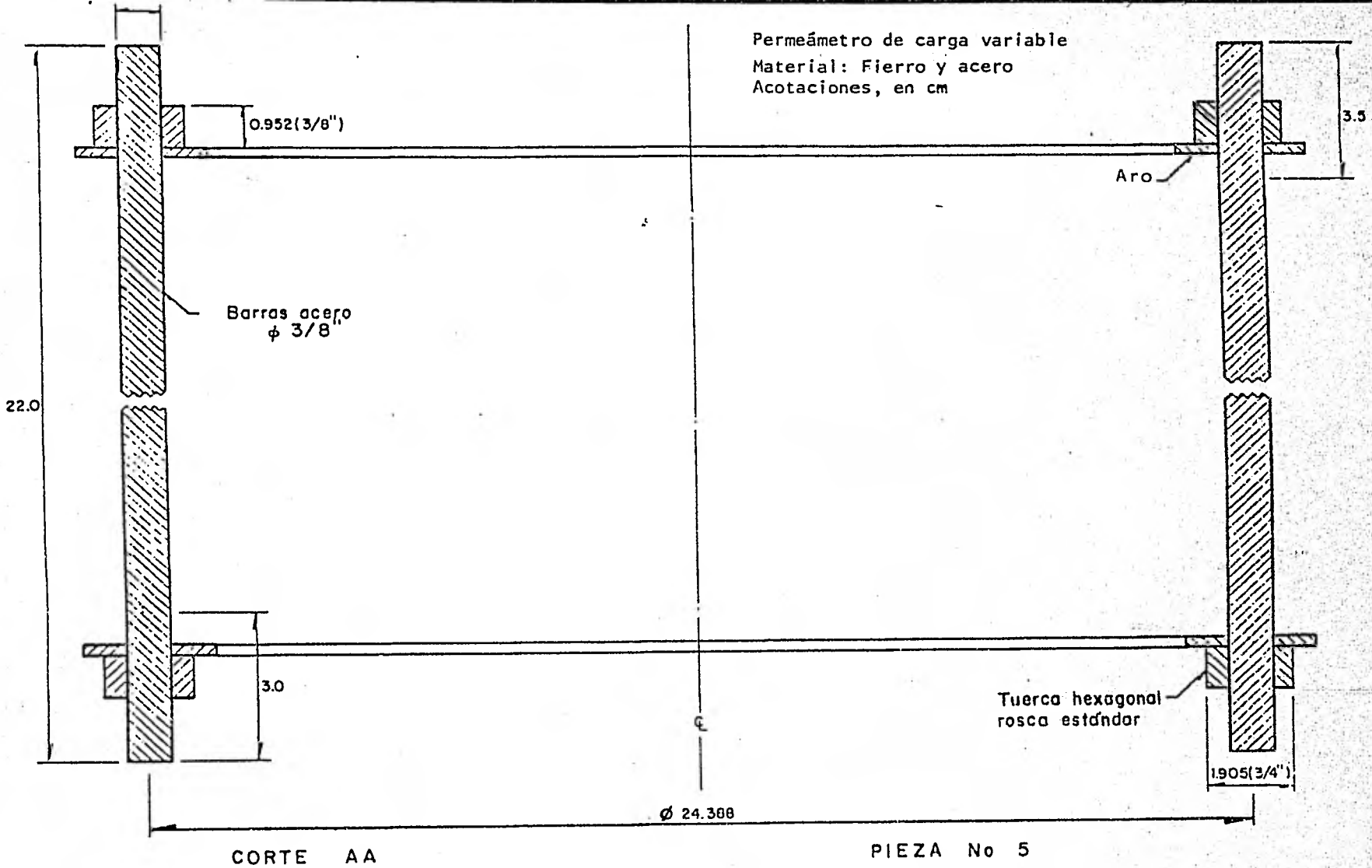
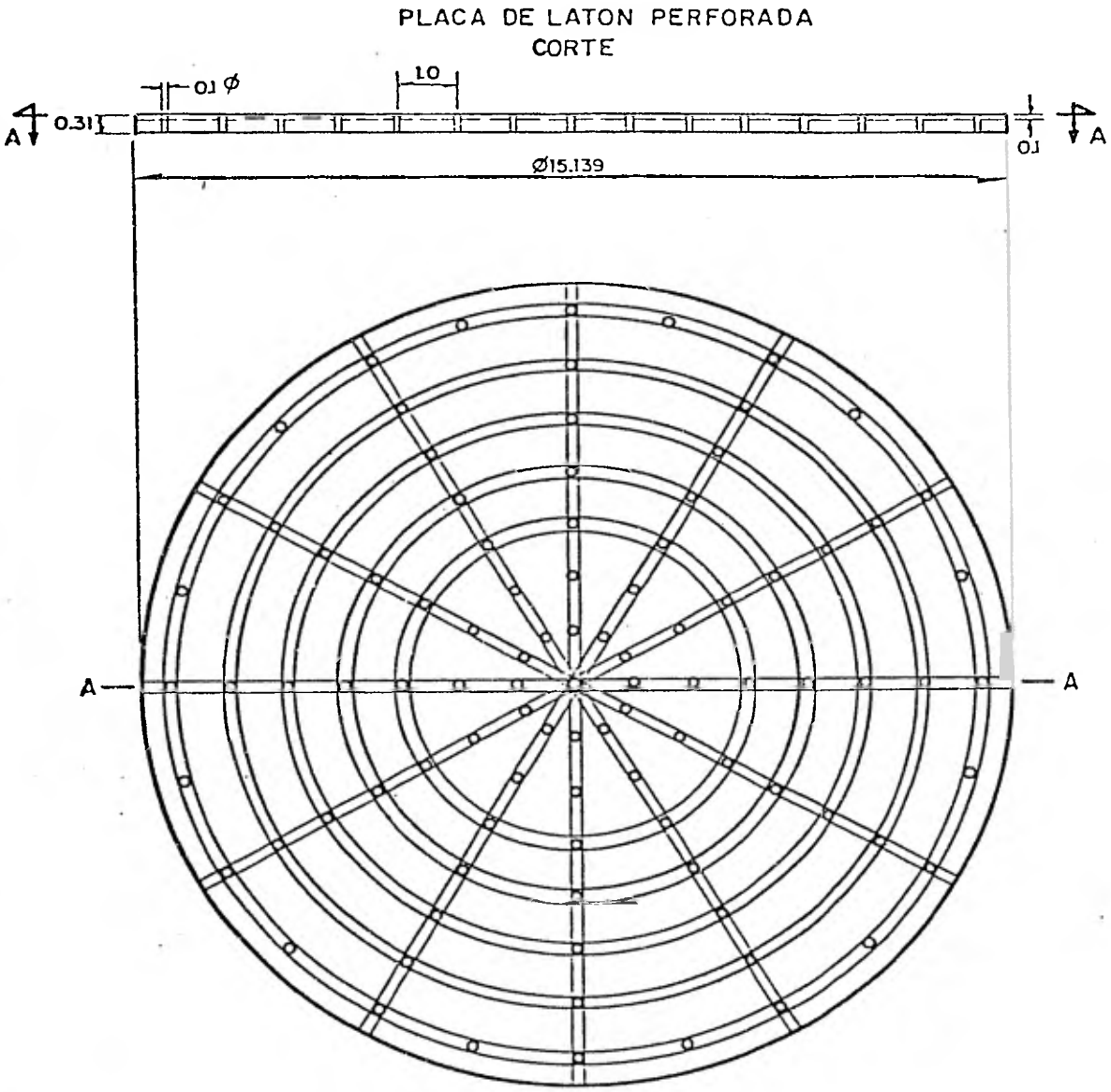


FIG 1.3.e Barras, aros y tuercas para cerrar el permeámetro

Permeámetro carga variable
Material laton: Acotaciones, en cm



PIEZA No.6

FIG 1.3.f Placa de latón perforada