5638

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS ESFUERZO-DEFORMACION DE LOS SUELOS Y ROCAS CON EL PRESIOMETRO DE MENARD

DESCARTE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

JOSE ANTONIO RANGEL LIÑAN

México, D. F. 1975

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.

A mis queridos padres:

Antonio Rangel Aguirre
Bertha Liñán de Rangel

A mis hermanos:

Gloria, Martha, Juan Carlos,
Norma y Jorge

A Mirella
con cariño

Al Ingeniero
Gabriel Auvinet Guichard
Director de tesis

Al Ingeniero
Leopoldo Espinosa Graham

A todas aquellas personas que me ayudaron en la elaboración de este trabajo, especialmente al Ingeniero Roberto Tavera Carmona

FACULTAD DE INGENIERIA
Exámenes Profesionales
Núm. 40-60
Exp.Núm. 40/214.2/

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Al Pasante señor JOSE ANTONIO RANGEL LIÑAN,
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.

"DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS ESFUERZO-DEFORMACION DE LOS SUELOS Y ROCAS CON EL PRESIOMETRO DE "ENARD"

1. Antecedentes
2. Descripción y funcionamiento del presiómetro
3. Realización de los ensayes y resultados obtenidos
4. Interpretación de los ensayes
5. Aplicación de los resultados
6. Conclusiones

Ruego a usted 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.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F., a 3 de abril de 1975
EL DIRECTOR

ING. ENRIQUE DEL VALLE CALDERON

EVC/GSA/glt.

I N D I C E

CAPITULO 1 ANTECEDENTES

CAPITULO 2 DESCRIPCION Y FUNCIONAMIENTO DEL PRESIOMETRO

2.1 Descripción general

2.2 Partes constitutivas

2.3 Funcionamiento

CAPITULO 3 REALIZACION DE LOS ENSAYES Y RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Operaciones previas

3.1.1 Establecimiento de los circuitos

3.1.2 Predilatación y calibración

3.1.3 Perforación

3.2 Procedimiento de ensaye

3.3 Presentación de los resultados obtenidos

CAPITULO 4 INTERPRETACION DE LOS ENSAYES

4.1 Interpretación de las curvas presiométricas

4.2 Análisis de las curvas presiométricas obtenidas

4.3 Análisis teórico del ensaye

CAPITULO 5 APLICACIONES DE LOS RESULTADOS

5.1 Aplicación al análisis de asentamientos

5.2 Aplicación al cálculo de capacidad de carga

CAPITULO 6 CONCLUSIONES

CAPITULO 1 ANTECEDENTES

El presiómetro de Ménard es un instrumento que se usa para determinar las características esfuerzo-deformación de los diferentes tipos de suelos y rocas. Dichas características tienen su aplicación en problemas relacionados con la ingeniería civil, más concretamente con la mecánica de suelos y de rocas.

El principio del presiómetro fue encontrado en 1930 por los alemanes - Koegler y Sheidig. Pero fue el francés Louis Ménard quien desarrolló, en 1957, el sistema mecánico que hiciera posible su uso en ensayes de suelos y rocas.

El método de ensaye se basa en un principio relativamente sencillo, -- pues parte del hecho que los diferentes tipos de suelos y rocas presentan también diferentes comportamientos cuando son sometidos a la acción de cualquier sistema de - cargas. El ensaye presiométrico consiste precisamente en aplicar cargas al terreno y medir sus deformaciones. De este modo, se obtienen gráficas de esfuerzo-deformación que permiten conocer el comportamiento del material en estudio.

Los ensayes presiométricos se realizan directamente en el sitio. Esto es una ventaja sobre los métodos de laboratorio en los cuales la alteración de las muestras, durante la extracción y el transporte, introduce una gran incertidumbre.

Se pueden mencionar dos ventajas adicionales del método de ensaye presiométrico: en primer lugar, su versatilidad, pues el aparato presiométrico puede ser usado en cualquier tipo de material, desde una arcilla muy blanda hasta una roca inalterada. En segundo lugar, el aparato presiométrico y sus accesorios, pueden ser transportados fácilmente al sitio mismo del ensaye.

Este aparato ha tenido aceptación en algunos paises de Europa y en Canadá; y en el transcurso de los años se han desarrollado nuevos diseños con el objeto de perfeccionarlo, tratando de lograr que los resultados obtenidos sean más confiables y puedan aplicarse con más seguridad. Por ejemplo, Yvon Broise y Alan Thorley (ref 1) inventaron un sistema presiométrico que permite medir el cambio de diámetro de la perforación con resortes que transmiten la información por medios electrónicos. Los impulsos eléctricos se registran directamente en un rollo de papel que está girando y cuyos ejes son el tiempo y el cambio de diámetro. Otro investigador, Jezequel (ref 2), diseñó un aparato presiométrico que ahorra algunas operaciones previas al ensaye propiamente dicho. También inventó un aparato de deformación controlada.

Los resultados que se obtienen mediante las técnicas presiométricas son aplicados principalmente a dos tipos de problemas de ingeniería civil: el análisis de asentamientos y el cálculo de capacidad de carga.

El presiómetro, el método de ensaye y las aplicaciones de los resultados obtenidos son poco conocidos en México. Es por ello que el propósito de este trabajo es darlos a conocer, para lo cual se describirán, el funcionamiento del aparato y la-

realización de las pruebas; se presentarán los resultados obtenidos y la interpretación teórica del ensaye; se mostrarán las principales aplicaciones de los resultados y se señalarán, por último, las ventajas y limitaciones del aparato, del método de ensaye y de las fórmulas de aplicación de los resultados.

CAPITULO 2 DESCRIPCION Y FUNCIONAMIENTO DEL PRESIOMETRO

2.1 Descripción general.

El aparato presiométrico consta de dos partes principales, que se pueden ver en forma esquemática en la fig 1:

a) Dispositivo de control presión-volumen

b) Sonda

El método de ensaye consiste en aplicar a la sonda, incrementos de presión por medio de agua, que son transmitidos en forma radial a las paredes de una perforación efectuada en el terreno. La deformación que se produce en el suelo o la roca en estudio, tiene relación con el volumen de agua almacenado en la sonda, el cual se registra en el volúmetro.

De este modo, se pueden conocer las características esfuerzo-deformación del material, relacionando en una gráfica las presiones y los volúmenes medidos.

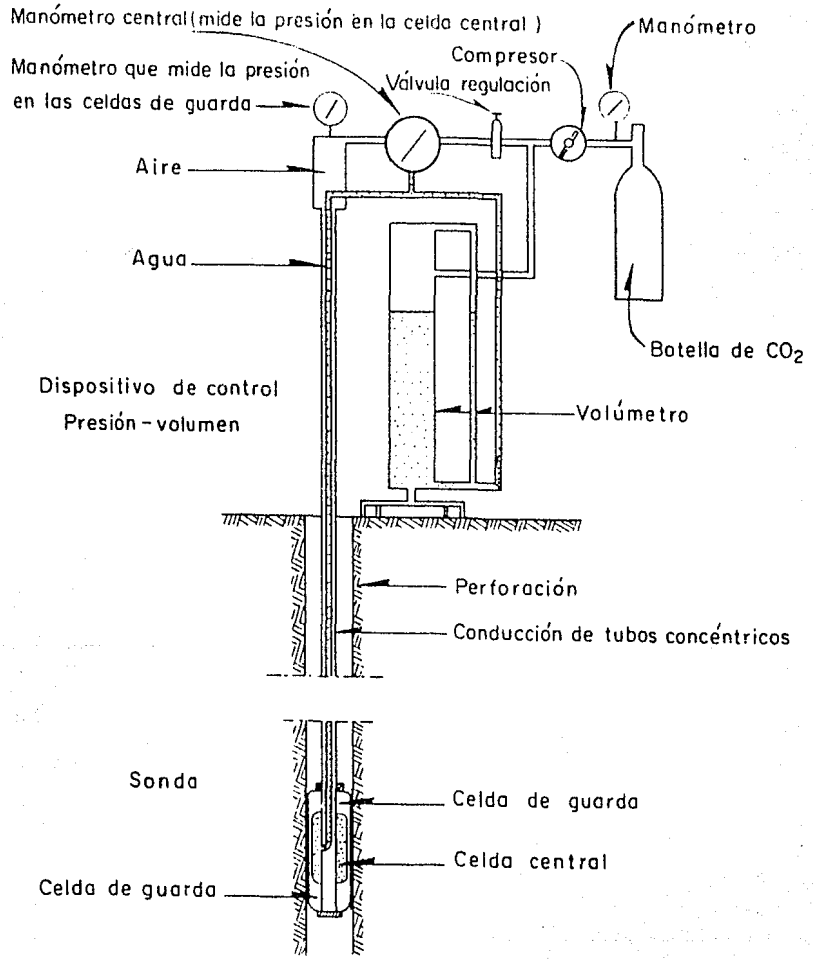


Fig 1 . Presiómetro de Ménard tipo G , en forma esquemática

2.2 Partes constitutivas.

Se mencionan aquí, las partes de que consta el presiómetro de Ménard - usado para este estudio. El tipo de aparato presiométrico considerado es el llamado- tipo G.

Es conveniente dividir en dos partes la lista de componentes del aparato. Primero se mencionarán las del dispositivo de control presión-volumen y en seguida - las del dispositivo que transmite las presiones al terreno, es decir, la sonda. Es necesario mencionar, que estas dos partes están unidas por una conducción formada de dos tubos concéntricos, que se describirá en detalle más adelante.

a) Dispositivo de control presión-volumen.

Este dispositivo se muestra en la fig 2 y consta de las siguientes partes:

1) Orificio de inyección de agua.

2) Llave de admisión de agua.

3) Volúmetro: medidor del volumen de agua que se va almacenando en- la celda central de la sonda, a cada instante y a cada incremento de presión. Consta de un cilindro que almacena el agua y un tubo transparente de pequeño diámetro, con una regla graduada, que muestra el nivel del agua en aquel cilindro.

4) Llave de paso de agua que en determinado momento, puede separar el tubo pequeño transparente, del cilindro que almacena el agua.

5) Llave de paso de agua, hacia el manómetro central 6, el bloque de acoplamiento 7 y la sonda, por la conducción de tubos concéntricos 17.

6) Manómetro central: mide la presión en la celda central de la sonda.

7) Bloque de acoplamiento: sirve de apoyo a algunas piezas del presiómetro, pero su importancia radica en que es aquí, de donde sale la conducción que

lleva el agua y el gas hacia la sonda, mediante dos tubos concéntricos; el interior conduce el agua y el exterior el gas. Un corte en detalle del acoplamiento y salida de dicha conducción, se puede ver en la fig 3. Este mecanismo es semejante al usado para separar los dos tubos a unos centímetros de la sonda.

En la fig 3 se muestran los siguientes elementos:

7.1) Tubo pequeño a través del cual se conduce agua, desde el conducto en el interior del bloque de acoplamiento, al tubo interior de la conducción que va hacia la sonda. Para evitar la comunicación de agua y gas, lleva unos sellos de hule como el 7.2.

7.3) Anillo que evita que el tubo pequeño 7.1 se desconecte.

7.4) Anillo que evita que el tubo exterior se cierre al apretar la tuerca 7.5 y permitir, de este modo, el paso libre del gas.

7.6) Barril deformable que evita la fuga de gas.

8) Botella de gas carbónico (CO_2). Cuando se utiliza el presiómetro para aplicar presiones importantes, por ejemplo, para estudiar el comportamiento de las rocas, se usa en lugar de gas carbónico, aire comprimido o nitrógeno. Esto es debido a que con el primero, no se pueden transmitir las altas presiones requeridas en un ensaye en rocas. Sin embargo, los dos últimos se pueden utilizar en cualquier tipo de material, pero cuando por algún motivo el recipiente que los contiene falla, sobreviene una peligrosa explosión, lo cual no ocurre con el CO_2.

9) Manómetro que mide la presión en la botella de gas carbónico.

10) Compresor.

11) Llave de purga de la presión aplicada al agua de la celda central de la sonda.

12) Orificio de entrada del gas para aplicar la presión deseada al agua de la celda central de la sonda.

13) Válvula de regulación de la presión en las celdas de guarda (para el caso en que la profundidad del ensaye sea menor de 10 m) o en la celda central (para el caso en que sea mayor de 10 m).

14) Llave de admisión del gas hacia el manómetro 15 y la conducción de tubos concéntricos que va a la sonda.

15) Manómetro que mide la presión en las celdas de guarda.

16) Llave de purga de la presión en las celdas de guarda.

17) Conducción de tubos concéntricos. Como ya se mencionó anteriormente, el tubo interior conduce el agua hacia la celda central de la sonda y el exterior el gas que llena las celdas de guarda. También esta disposición sirve para que el tubo interior no sufra dilatación alguna por efecto de la presión transmitida y no haya error en la medición de los volúmenes desplazados hacia la celda central, por causa de este concepto.

18) Placa de protección del manómetro 15.

19) Soporte plegable: es el apoyo del dispositivo de control presión-volumen.

b) Sonda.

La sonda es la parte del presiómetro que sufre dilatación cuando se incrementa el volumen de agua en su interior, causado por el aumento de presión del gas. De este modo, transmite las presiones recibidas a las paredes de la perforación produciendo su desplazamiento. Puede ser de todos los tamaños y diámetros posibles, pero son los más comunes aquellos de 44, 60 y 91 cm de diámetro y de unos 70 a 100 cm

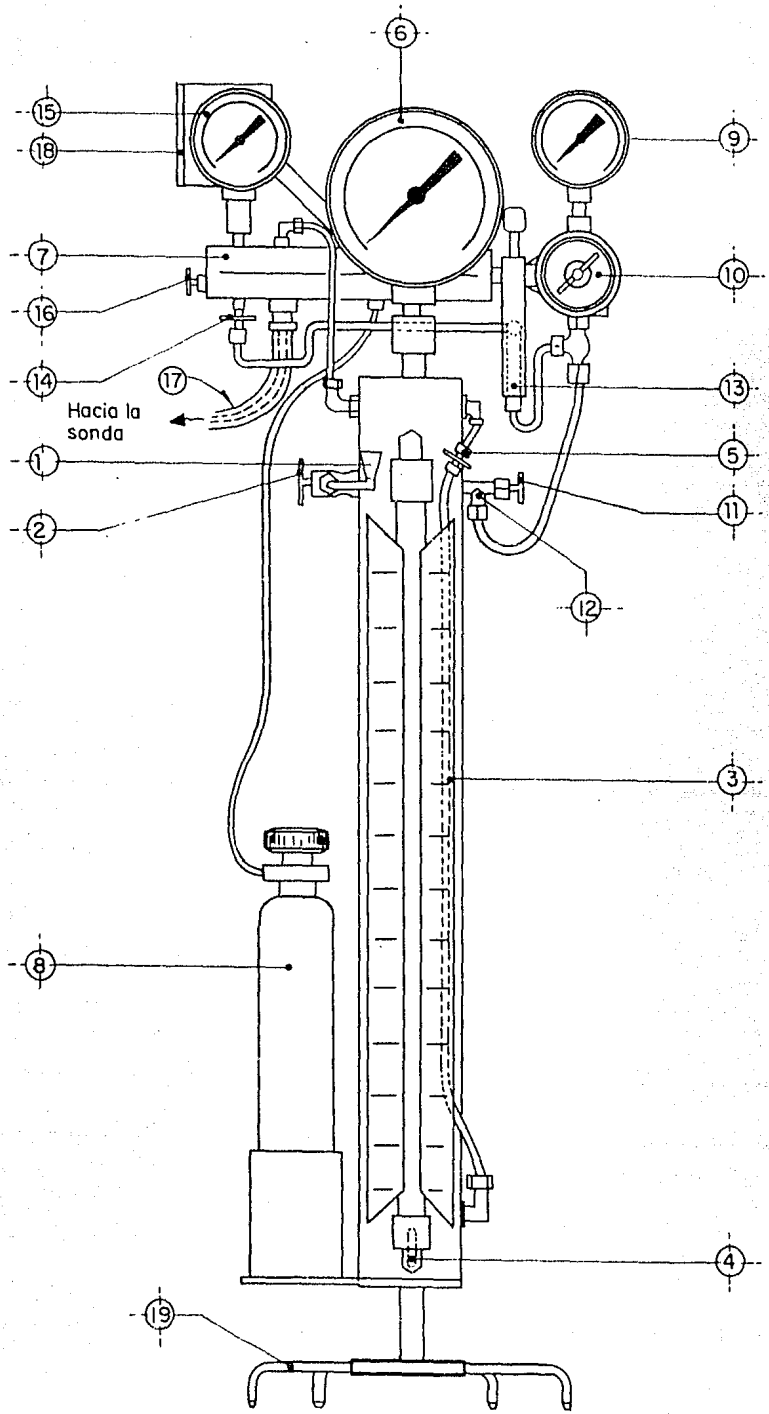


Fig 2. Dispositivo de control presión - volumen

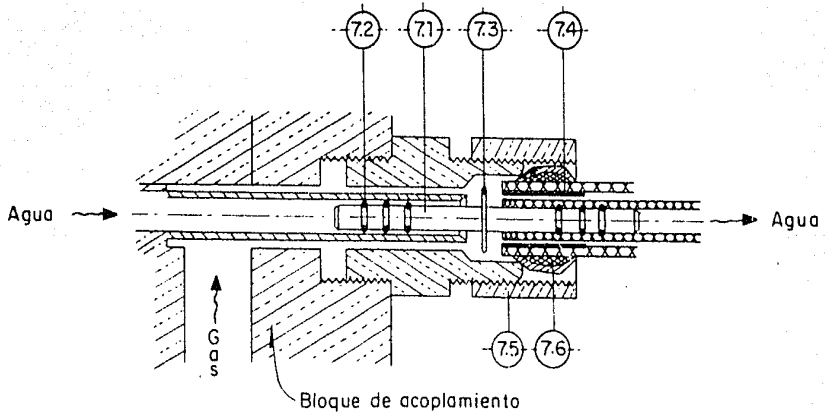


Fig 3. Acoplamiento y salida de la conducción de tubos concéntricos

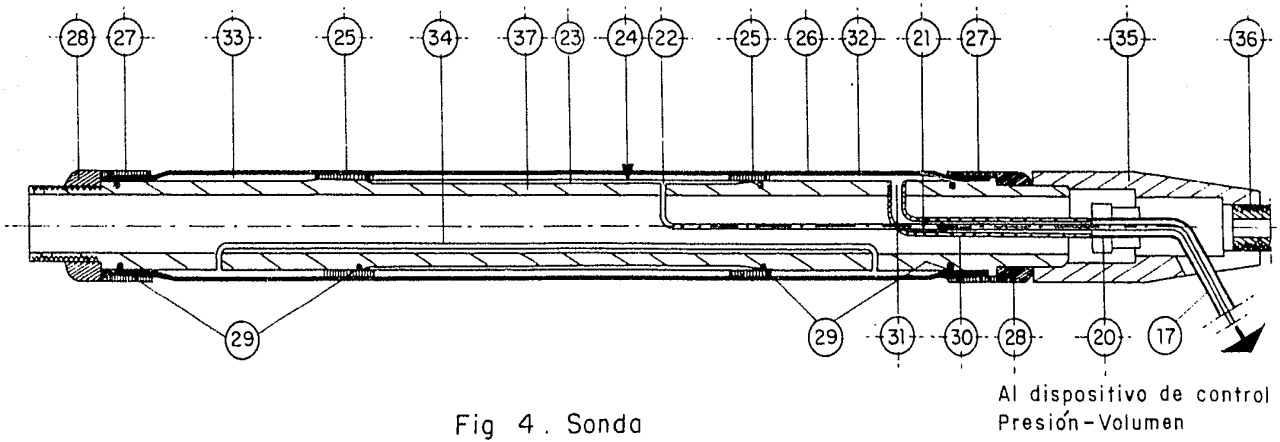


Fig 4. Sonda

de altura. El tipo de sonda usada en este trabajo consta esencialmente de las siguientes partes (fig 4):

20) Desacoplamiento de la conducción de tubos concéntricos.

21) Tubo que conduce el agua hacia la celda central.

22) Orificio de entrada del agua a la celda central.

23) Celda central.

24) Membrana de hule sujetada por dos anillos troncocónicos 25.

26) Funda de protección sujetada por dos anillos troncocónicos 27. Esta funda es de hule si el terreno en el cual se hace la prueba, no contiene partículas tales que puedan perforarla. En caso contrario, se utiliza una funda de hule recubierta con láminas metálicas delgadas.

28) Anillos atornillados que sirven de protección a los anillos troncocónicos 27.

29) Sellos de hule.

30) Tubo que conduce el gas hacia las celdas de guarda.

31) Orificio de entrada del gas a las celdas de guarda.

32) Celda de guarda superior.

33) Celda de guarda inferior. Es conveniente mencionar que las celdas de guarda, colocadas en los extremos de la sonda, aseguran una repartición uniforme de esfuerzos y deformaciones al nivel de la celda central.

34) Tubería de comunicación entre las dos celdas de guarda.

35) Mango de conexión entre la sonda y las barras largas 36 que sirven para guiar la sonda.

37) Cilindro de acero que forma el esqueleto de la sonda.

Son accesorios del aparato presiométrico el ademe ranurado y el ademe rígido, usados en suelos inestables en presencia de la excavación. El primero consta de un sistema de ranuras verticales que permiten su expansión al aplicarse cargas laterales con la sonda.

También se usa lodo bentonítico para estabilizar las paredes de la perforación, el cual se inyecta a través de una pieza especial, atornillada al extremo inferior de la sonda. En seguida se pueden hacer las pruebas presiométricas requeridas sin que influya el lodo en los resultados obtenidos.

2.3 Funcionamiento.

Se describirá en este inciso, el recorrido del agua y del gas dentro del aparato, cuando han quedado establecidos los circuitos respectivos.

Partiendo del volúmetro 3, el agua pasa por las llaves 4 y 5, por el manómetro central 6 y el bloque de acoplamiento 7, de donde sale hacia la sonda por el tubo interior de la conducción 17.

En 20 se desacoplan los tubos y el agua sigue por el conducto 21, luego entra por el orificio 22 y llega a la celda central de la sonda, que se dilata al aplicarse las presiones requeridas durante el ensaye.

El recorrido del gas cuando se abre la botella que lo contiene, es el siguiente:

Por una tubería en el interior del bloque de acoplamiento el gas va hacia el manómetro 9, donde se registra la presión del mismo en la botella. Al accionar el compresor 10, el gas tiene dos caminos: si la profundidad del ensaye es menor de 10 m , la instalación de las tuberías es como se muestra en la fig 5, es decir, el gas es conducido por una tubería hacia el orificio 12, para aplicar la presión deseada

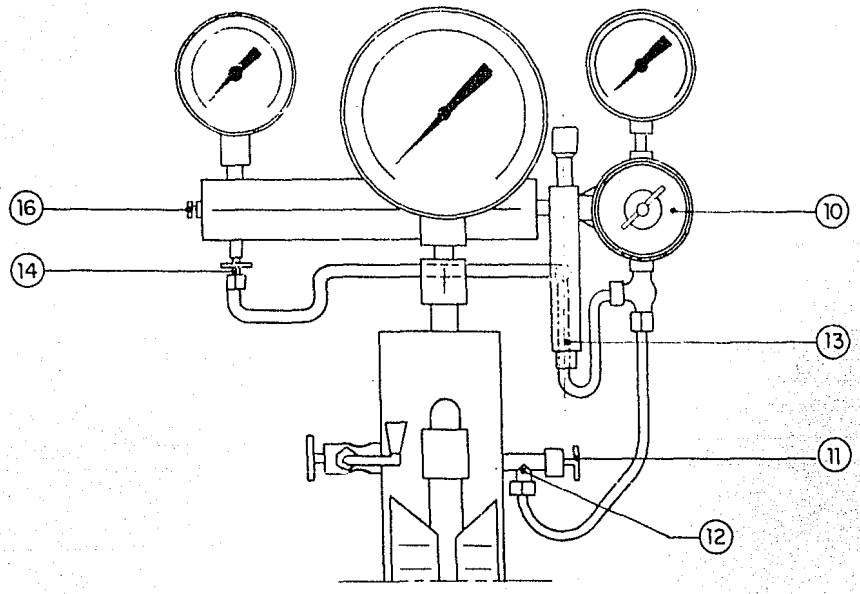


Fig 5. Instalación de las tuberías para ensayes a menos de 10 m de profundidad

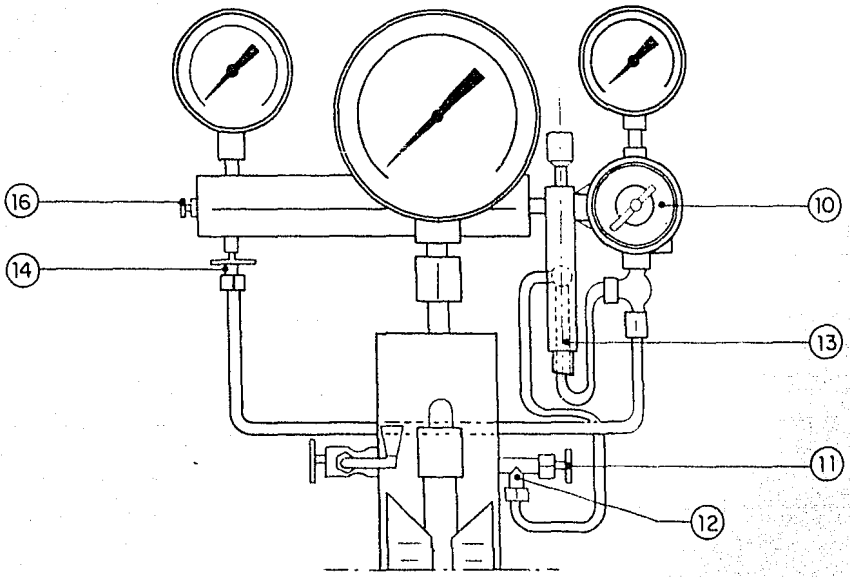


Fig 6. Instalación de las tuberías para ensayes a más de 10 m de profundidad

al agua de la celda central. Por la otra tubería, el gas va hacia la llave 14, teniendo de intermediaria a la válvula de regulación 13. Si la profundidad del ensaye es mayor de 10 m , entonces la instalación de las tuberías se hace según la fig 6, es decir, que al accionar el compresor, el gas que pasa por 12 para aplicar la presión deseada a la celda central, tiene de intermediaria a la válvula de regulación. Por la otra tubería el gas va directamente a la llave 14.

A continuación, el gas pasa a través de la llave 14 y dentro del bloque de acoplamiento la conducción se bifurca. Una de las tuberías va hacia el manómetro 15, que mide la presión en las celdas de guarda y la otra conduce el gas hacia la conducción de tubos concéntricos. Por el tubo exterior el gas, es llevado hacia la sonda y después del desacoplamiento en 20, sigue por el tubo 30 y luego entra por el orificio 31, para llenar la celda de guarda superior. Después pasa a través de la tubería 34 y llega finalmente a la celda de guarda inferior.

CAPITULO 3 REALIZACION DE LOS ENSAYES Y RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Operaciones previas.

3.1.1 Establecimiento de los circuitos.

En este inciso se describirán las operaciones necesarias para establecer el flujo de agua y aire en los circuitos respectivos del presiómetro.

En primer lugar debemos llenar de agua el sistema. Sin conectar aún la sonda, en el dispositivo de control presión-volumen, se hace lo siguiente:

Se abren las llaves 2, 4, 5 y 11, debiendo permanecer las demás cerradas. Por el orificio 1 se inyecta agua con la ayuda de un embudo y se llena el volúmetro con el líquido. Para llevar el agua al sistema restante, incluyendo la conducción de tubos concéntricos, se aplica presión al circuito. Esto se hace cerrando las llaves 2 y 11, abriendo enseguida la botella de gas y accionando el compresor 10. El agua sale por el extremo de la conducción y el nivel baja en el volúmetro (no debe drenarse toda el agua disponible en él). Luego se cierra la llave 5 para detener el

flujo, se gira nuevamente el compresor pero ahora en sentido contrario y se abre la - llave de purga 11.

Se reinician las operaciones de llenado del sistema como se indicó arriba y el proceso termina cuando se han eliminado todas las burbujas de aire que pudieron quedar atrapadas en el circuito.

Después se conecta la conducción de tubos concéntricos a la sonda y - se vuelve a aplicar presión al circuito de agua para llenar la celda central. Antes de que se empiece a inflar la sonda, debe desconectarse.

El tubo interior de la conducción de tubos concéntricos, de ahora en - adelante debe seguir drenando, para lo cual se aplica una pequeña presión. De este modo, se evita la entrada de aire por este extremo; sin embargo debe tenerse cuidado de no rebasar el volumen disponible en el volúmetro (750 cm^3), ya que por este extremo también podría entrar aire al sistema.

Por otro lado, es necesario remover todas las burbujas de aire que están acumuladas en la sonda. Esto se logra amasando la sonda con las manos en la parte correspondiente a la celda central.

Cuando se tiene la seguridad de que no existen más burbujas de aire en la sonda, se conecta la conducción de tubos concéntricos (que siguen drenando) y - por último se gira la llave del compresor, se abre la llave 11 para quitar la presión al agua de la celda central y se deja estabilizar el sistema teniendo abiertas, además de las llaves 4, 5 y 11, las llaves 14 y 16. Enseguida el volúmetro se llena de agua nuevamente, hasta que el indicador marque el nivel cero.

En esta forma el aparato presiométrico queda listo para la realización - de los ensayes, no sin antes hacer la predilatación, si la sonda es nueva y la calibra

ción en todos los casos.

3.1.2 Predilatación y Calibración.

Si la sonda que se va a usar es nueva es necesario predilatarla. Inicialmente el hule y las láminas delgadas flexibles de las sondas presentan una gran rigidez y requieren que se les infle y desinfle para que adquieran mayor flexibilidad.

Esta operación se desarrolla en dos etapas:

Durante la primera etapa se hace perder la rigidez a la funda de protección, inyectando aire a las celdas de guarda solamente. Esto se hace de la siguiente manera: se abren la botella de gas y la llave de admisión del mismo 14; todas las demás llaves deben permanecer cerradas. Luego se acciona el compresor 10 y la sonda se infla hasta alcanzar un diámetro de 70 ó 95 cm si originalmente era de 44 ó 60 cm de diámetro respectivamente; estos valores especificados no deben rebasarse para evitar dañar la sonda.

Para desinflar la sonda se cierra la llave 14, se acciona el compresor para no dejar pasar más gas a aplicar presión y por último se deja escapar el gas por el orificio 16. Se considera que con 4 ciclos queda predilatada la funda de protección.

En la segunda etapa de la predilatación se hace perder la rigidez a la membrana de la celda central. Para ello se realizan las operaciones siguientes: se abren las llaves 4 y 5, la botella de gas y se aplican incrementos de presión al agua de la celda central accionando el compresor 10 hasta que el volumen inyectado sea de unos 750 cm^3. Cuando se llega a este valor se cierra la llave 5, se gira el compresor y se abre la llave de purga 11. Esta operación debe repetirse, igual que en el caso anterior, unas 4 veces.

Terminados estos pasos se procede a calibrar la sonda. Esta operación se realiza como si se estuviera haciendo una prueba presiométrica, pero con la sonda al nivel del piso. Para ello es necesario abrir las llaves 4, 5 y 14, la botella de gas y tratar de conservar una diferencia de un bar* de presión entre la celda central y las celdas de guarda, siendo mayor en la primera, lo cual se hace girando la válvula de regulación, accionando el compresor y verificando que la diferencia se conserve. Cuando se ha ajustado esto, se empiezan a aplicar incrementos de presión y a los 15, 30 y 60 seg después de aplicado cada incremento, se leen los volúmenes de agua desplazados correspondientes.

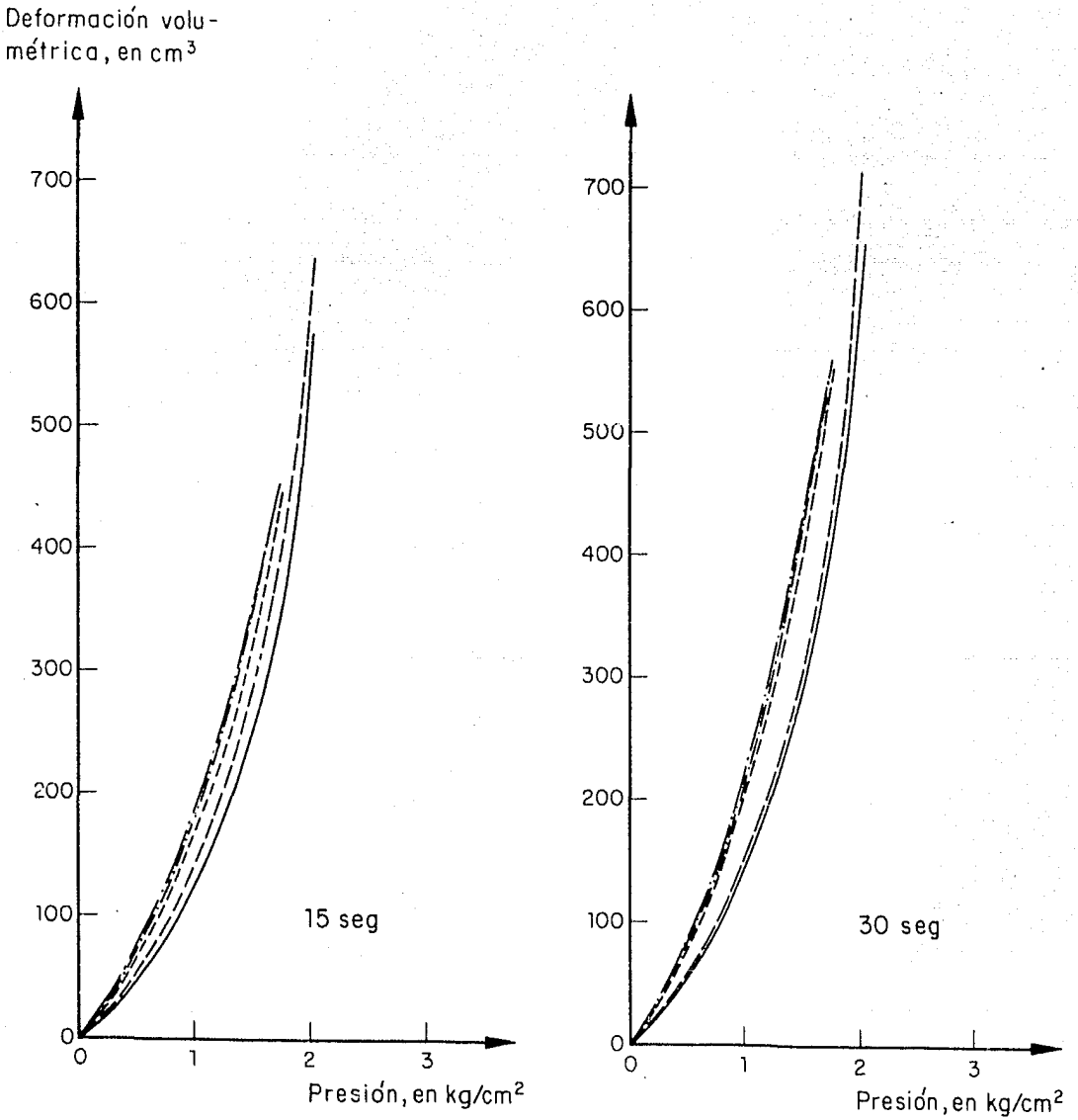
Las gráficas de las figs 7, 8 y 9 son el resultado de mediciones realizadas en esta forma. Dichos resultados, en pruebas sucesivas, deben compararse y cuando coinciden aproximadamente entre si, se puede obtener la curva de calibración tomando la última o un promedio de las últimas curvas.

La curva de calibración (fig 10) se obtuvo promediando las tres últimas curvas de la fig 9. Como se verá más adelante solo es necesaria esta última curva para hacer los cálculos y los dibujos de las curvas presiométricas.

3.1.3 Perforación.

La realización de la perforación, donde se introduce la sonda para efectuar un ensaye presiométrico, es otra de las operaciones previas. Dicha perforación debe ser sensibiemente del mismo diámetro que el de la sonda a usar, para que con una pequeña deformación se ponga en contacto con las paredes de la misma. Lo anterior es importante debido a que el aparato presiométrico solo tiene un cierto volumen de agua disponible para el ensaye (750 cm^3) y si la sonda no se pusiera inmediata -

* 1 bar = 1.02 Kg/cm^2



Figs 7 y 8. Calibración. Lecturas a los 15 y 30 seg después de aplicado un incremento de presión

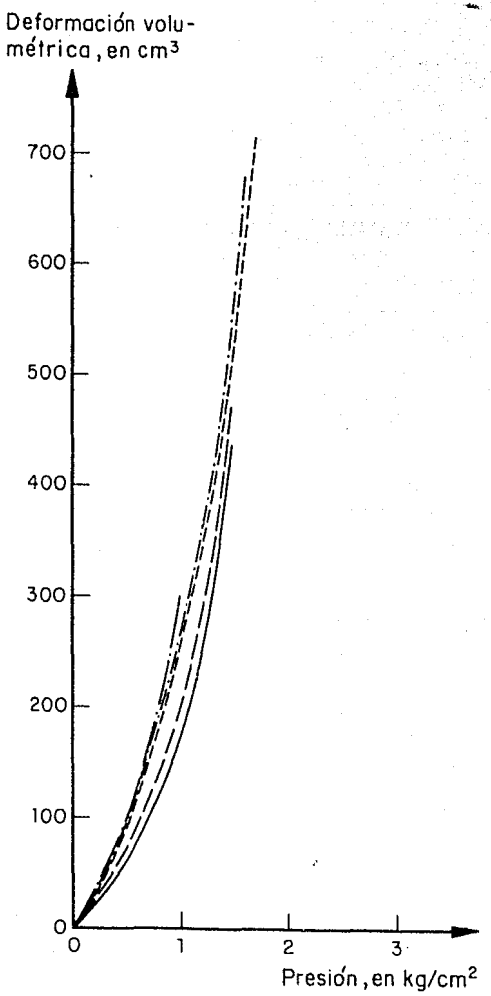


Fig 9. Calibración. Lecturas a los 60 seg después de aplicado un incremento de presión

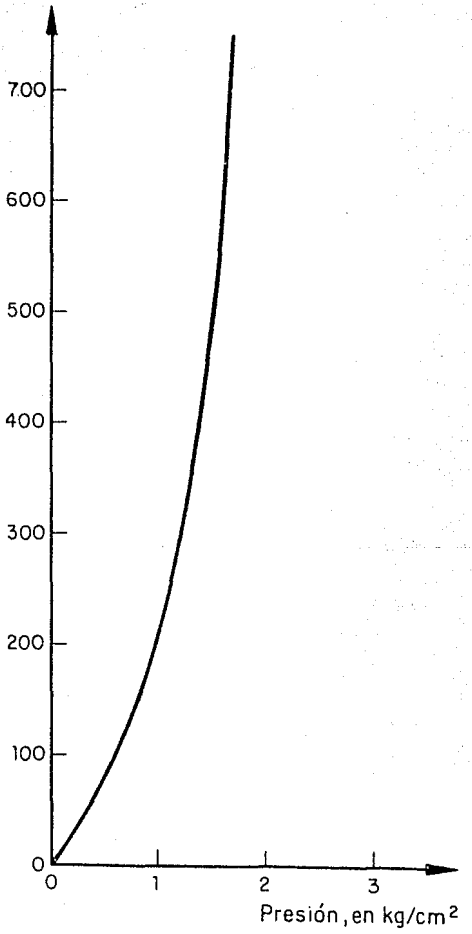


Fig 10. Curva de calibración de la sonda

mente en contacto con las paredes de la perforación, podría agotarse ese volumen disponible y no se llegaría a encontrar el momento de la falla del material en estudio, que es uno de los resultados interesantes que se pueden obtener mediante este método de ensaye.

Para efectuar la perforación se pueden usar desde perforadoras manuales hasta equipos muy complicados de percusión o rotación. El equipo y el método para realizar la perforación dependen del tipo de suelo o roca encontrado en el lugar, pero en todos los casos debe procurarse que las características del material no sean alteradas por las operaciones de perforación.

Se consideran tres casos principales:

a) Materiales que permanecen estables en presencia de la perforación.

En este caso la perforación puede hacerse a mano con posteadora helicoidal o con equipo de percusión. Enseguida se introduce la sonda y se realizan los ensayes requeridos.

b) Suelos blandos inestables en presencia de la perforación.

La perforación se hace a mano con posteadora helicoidal, no siendo recomendable usar martinetes en suelos arcillosos porque sus características se alteran al remoldearse. Para estabilizar la perforación se inyecta lodo bentonítico o se usa como ademe el tubo rígido. En este último caso la sonda se coloca, para el ensaye, abajo del extremo inferior de este tubo.

c) Arenas y gravas inestables en presencia de la perforación.

Es imposible mantener estable una perforación en este tipo de suelos, sobre todo si están abajo del nivel freático. En este caso los ensayes se hacen introduciendo la sonda dentro del ademe ranurado para mantener estable la pared de la per-

foración y de este modo, realizar la prueba.

3.2 Procedimiento de ensaye.

Teniendo listo el aparato presiométrico y preparada la perforación como se detalló en el inciso 3.1, se procede a introducir la sonda dentro de la misma, hasta el nivel del ensaye. En el extremo superior de la sonda se atornillan unas barras largas con el objeto de que la sonda pueda introducirse dentro de la perforación y después retirarse con facilidad al terminar el ensaye. A continuación se hace lo siguiente en el dispositivo de control presión-volumen:

Considerando que todas las llaves están cerradas se abre la botella de gas, cuya presión se registra en el manómetro 9. Luego se abren las llaves 4, 5 y 14 y se lee el valor inicial del volumen en la regla graduada del volúmetro. Enseguida se pueden aplicar los incrementos de presión que sean necesarios durante el ensaye, (se recomiendan cuando menos 10 lecturas de presiones con sus volúmenes correspondientes), de la siguiente manera:

Se supondrá que con un incremento de 0.5 bars de presión cada vez, es suficiente para cumplir con la condición anterior. Entonces accionando el compresor 10 se da la presión inicial de 0.5 bars que se mide en el manómetro central. En el momento de aplicar dicha presión se acciona un cronómetro y se mide el volumen de agua que entra en la sonda a los 15, 30, 60 seg y eventualmente a los 2 min.

Enseguida se incrementa la presión, accionando nuevamente el compresor hasta llegar a 1.0 bars, volviéndose a tomar lecturas en el volúmetro en los mismos intervalos de tiempo mencionados arriba.

A cualquier profundidad de ensaye la presión en la celda central debe ser 1.0 bars mayor que en las celdas de guarda. Esta diferencia se regula en el ini-

cio del ensaye y debido a la carga hidrostática producida en la sonda por la diferencia de altura entre ésta y el volúmetro, se modifica cada determinada profundidad - según la tabla 1.

En el caso de un ensaye a menos de 10 m de profundidad (ver fig 5), se acciona la válvula de regulación 13 en el momento que sea necesario producir la diferencia. Después se regulan las presiones en ambas celdas con el compresor 10. - Por ejemplo, según la tabla 1 en un ensaye al nivel de la superficie es necesario - tener una diferencia de 1.0 bars. Entonces cuando se aplican 1.5 bars al circuito de agua, se acciona la válvula de regulación para dar a las celdas de guarda una presión de 0.5 bars. De aquí en adelante el ensaye se controla con el compresor, que permite mantener constante esta diferencia.

En ensayes a más de 10 m de profundidad (ver fig 6), se acciona el compresor para dar presión a las celdas de guarda hasta producir la diferencia que - debe haber entre las celdas según la tabla 1. El resto del ensaye se regula nuevamente con el compresor que mantendrá siempre la misma diferencia de presión.

Durante el ensaye debe tenerse cuidado de no sobrepasar el volumen de agua disponible en el volúmetro porque inmediatamente entra aire al circuito, lo - cual debe evitarse.

Es necesario mencionar que los ensayes presiométricos se realizan a lo - largo de la perforación hasta la profundidad deseada, obteniéndose de este modo, información de las características esfuerzo-deformación del material a diferentes profundidades. Sin embargo, hay que tener en cuenta que no debe haber interferencia entre las pruebas presiométricas, ya que los resultados se alteran. Esto se evita dejendo cuando menos una diferencia de un metro entre pruebas en la misma perforación.

Profundidad del ensaye (m)	Diferencia de presión entre los manómetros (6) y (15). (bars)	Observación
0.0 - 0.9	1.0	
1.0 - 1.9	0.9	
2.0 - 2.9	0.8	
3.0 - 3.9	0.7	En este intervalo de profundidades las lecturas en el manómetro (6) son mayores que en el manómetro (15).
4.0 - 4.9	0.6	
5.0 - 5.9	0.5	
6.0 - 6.9	0.4	
7.0 - 7.9	0.3	
8.0 - 8.9	0.2	
9.0 - 9.9	0.1	
10.0 - 10.9	0.0	
11.0 - 11.9	0.1	De estas profundidades en adelante las lecturas en el manómetro (15) son mayores que en el manómetro (6).
12.0 - 12.9	0.2	
13.0 - 13.9	0.3	
14.0 - 14.9	0.4	

TABLA 1. Valores recomendados para las diferencias en las lecturas de los manómetros (6) y (15), dependiendo de la profundidad del ensaye.

Esta necesidad produce una discontinuidad de información sobre el comportamiento del material y puede provocar que determinado estrato importante no sea detectado.

3.3 Presentación de los resultados obtenidos.

En el transcurso de una prueba presiométrica se obtienen valores de los volúmenes de agua inyectados en la sonda y de las presiones aplicadas, correspondientes a un determinado tiempo. Estos dos conceptos, volúmenes y presiones, se relacionan en gráficas cuyas curvas resultantes se denominan curvas presiométricas.

Las curvas presiométricas que se presentan aquí, han sido corregidas. Por ello se señalan a continuación las correcciones que deben hacerse para obtener las presiones reales que se aplican al terreno y los volúmenes de agua reales que se inyectan a la sonda y determinan el desplazamiento radial del material en estudio.

a) Corrección de las presiones.

La presión real aplicada al terreno es:

$$P = Pm + Pz - P(V)$$

donde:

Pm = presión leída en el manómetro central

Pz = presión por carga hidrostática, producida por la diferencia de altura entre el dispositivo de control presión-volumen y la sonda o si el nivel freático está a una profundidad menor que la sonda, entre dicho dispositivo y el nivel de aguas freáticas. Esta corrección es constante durante todo el ensaye.

P(V) = presión necesaria para inflar la sonda debido a su rigidez. Esta es función del volumen de agua que se inyecta a la sonda y se determina por calibración (ver fig 10).

b) Corrección de los volúmenes.

Ménard propone (ref 3) una corrección a los volúmenes leídos, debido a la expansión de las tuberías de plástico, que se calcula con la fórmula siguiente:

$$Va = a \cdot Pm$$

donde:

Va = valor de la corrección que se debe restar al volumen leído en el volúmetro al aplicar la presión Pm.

a = constante experimental característica del tipo y longitud de tubería. Para un sistema de tubos concéntricos de 3 y 6 mm de diámetro interior y 4 y 10 mm de diámetro exterior, de 25 m de longitud, adquiere el valor 0,1 cm^3/bar. Para los fines prácticos esta corrección puede ser despreciada.

Con los resultados anteriores se obtienen dos tipos de curvas presiométricas que se dibujan en un sistema de ejes ortogonales. La primera de ellas relaciona las presiones aplicadas, (sobre el eje de las abscisas) y los volúmenes de agua leídos a los 60 seg después de aplicar la presión correspondiente, (deformación volumétrica V_{60}, sobre el eje de las ordenadas).

Al escoger el valor de los volúmenes leídos a los 60 seg se intenta conciliar dos objetivos: el de realizar un número mayor de ensayes en el menor tiempo posible y el de obtener una mayor exactitud con ensayes de mayor duración.

La segunda curva presiométrica se dibuja colocando en el eje de las abscisas las presiones aplicadas, como en el caso anterior, pero en el eje de las ordenadas la diferencia de los volúmenes de agua medidos entre los 60 seg (V_{60}) y los 30 seg (V_{30}), que corresponden a una determinada presión. Esta curva representa la fluencia del material.

A continuación se van a presentar las curvas presiométricas obtenidas en suelos compactados de diversos sitios:

Pista circular de prueba de la Sección de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería. U. N. A. M.

Perforación N° 1 (Tabla 2, fig N° 11)

Perforación N° 2 (Tabla 3, fig N° 12)

Perforación N° 3 (Tabla 4, fig N° 13)

Terraplén del Km 0 + 800, ramal Oriente del camino Vialidad Sur de la Ciudad de México, tramo entronque Boulevard la Luz-Ajusco.

Perforación N° 1, Prueba N° 1 (Tabla 5, fig 14)

Perforación N° 1, Prueba N° 2 (Tabla 6, fig 15)

Perforación N° 2, Prueba N° 1 (Tabla 7, fig 16)

Perforación N° 2, Prueba N° 2 (Tabla 8, fig 17)

Perforación N° 2, Prueba N° 3 (Tabla 9, fig 18)

Perforación N° 3, Prueba N° 1 (Tabla 10, fig 19)

Perforación N° 3, Prueba N° 2 (Tabla 11, fig 20)

Perforación N° 3, Prueba N° 3 (Tabla 12, fig 21)

Perforación N° 4, Prueba N° 1 (Tabla 13, fig 22)

Perforación N° 4, Prueba N° 2 (Tabla 14, fig 23)

Perforación N° 4, Prueba N° 3 (Tabla 15, fig 24)

En el capítulo 4 se presentará la interpretación de los ensayes presiométricos y la forma de derivar de ellos los resultados de interés para problemas de ingeniería.

Pm	Pz	P(V)	P	V_{30}	V_{60}	$V_{60} - V_{30}$
Kg/cm^2	Kg/cm^2	Kg/cm^2	Kg/cm^2	cm^3	cm^3	cm^3
0.61	0.12	1.19	0.54	18	19	1
1.02	0.12	0.28	0.86	30	30	0
1.58	0.12	0.38	1.32	42	43	1
2.04	0.12	0.42	1.74	49	50	1
3.06	0.12	0.48	2.70	59	60	1
4.08	0.12	0.53	3.67	69	70	1
5.10	0.12	0.58	4.64	78	79	1
6.12	0.12	0.67	5.57	95	97	2
7.14	0.12	0.83	6.43	131	137	6
8.31	0.12	1.09	7.34	206	229	23
9.38	0.12	1.50	8.00	371	447	76
10.46	0.12			678		

TABLA 2. Profundidad del ensaye 1.20 m.

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
0.71	0.12	0.20	0.63	20	21	1
1.63	0.12	0.33	1.42	36	37	1
2.10	0.12	0.39	1.83	44	45	1
3.21	0.12	0.44	2.89	55	56	1
4.34	0.12	0.55	3.91	69	73	4
5.10	0.12	0.66	4.56	91	96	5
6.12	0.12	0.89	5.35	146	159	13
7.14	0.12	1.28	5.98	274	325	51
8.21	0.12			606		

TABLA 3. Profundidad del ensaye 1.20 m.

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
0.59	0.12	0.30	0.41	31	33	2
1.02	0.12	0.40	0.74	47	49	2
1.63	0.12	0.49	1.26	61	63	2
2.04	0.12	0.54	1.62	70	72	2
3.06	0.12	0.65	2.53	91	94	3
4.08	0.12	0.83	3.37	138	143	5
5.10	0.12	1.17	4.05	239	268	29
6.38	0.12	1.70	4.80	489	595	106

TABLA 4. Profundidad del ensaye 1.20 m.

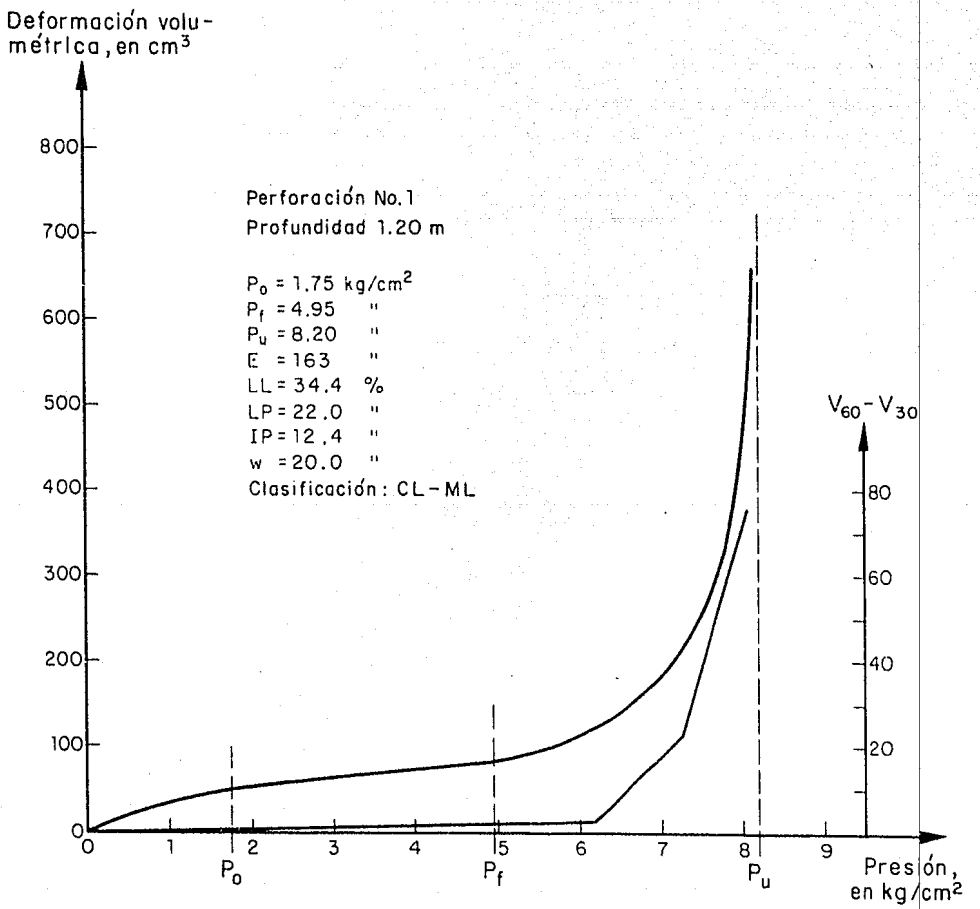

Deformación volumétrica, en cm³
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Perforación No.1
Profundidad 1.20 m
P_o = 1.75 kg/cm²
P_f = 4.95 "
P_u = 8.20 "
E = 163 "
LL = 34.4 %
LP = 22.0 "
IP = 12.4 "
w = 20.0 "
Clasificación: CL-ML
$V_{60} - V_{30}$
80
60
40
20
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
P_o
P_f
P_u
Presión, en kg/cm²

Fig 11

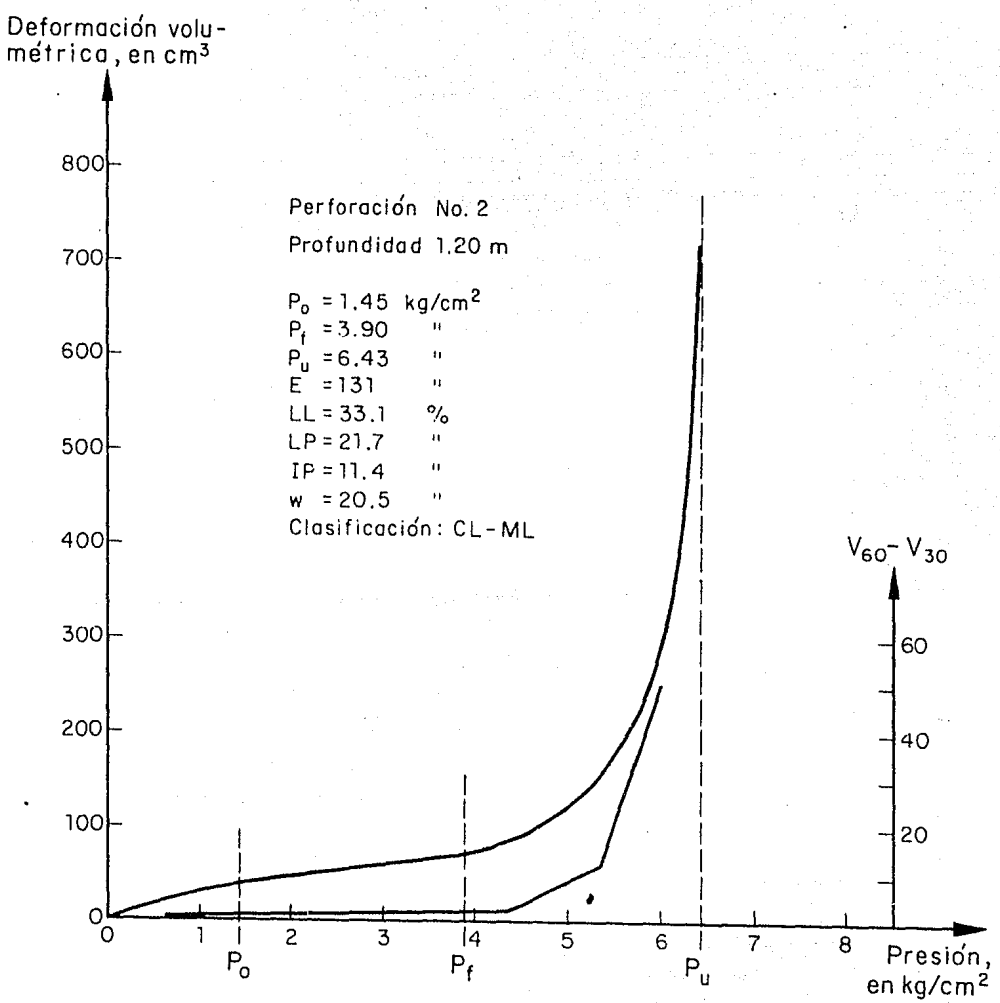

Deformación volumétrica, en cm³
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Perforación No. 2
Profundidad 1.20 m
P_o = 1.45 kg/cm²
P_f = 3.90 "
P_u = 6.43 "
E = 131 "
LL = 33.1 %
LP = 21.7 "
IP = 11.4 "
w = 20.5 "
Clasificación: CL-ML
$V_{60} - V_{30}$
60
40
20
0
1
2
3
4
5
6
7
8
P_o
P_f
P_u
Presión, en kg/cm²

Fig 12

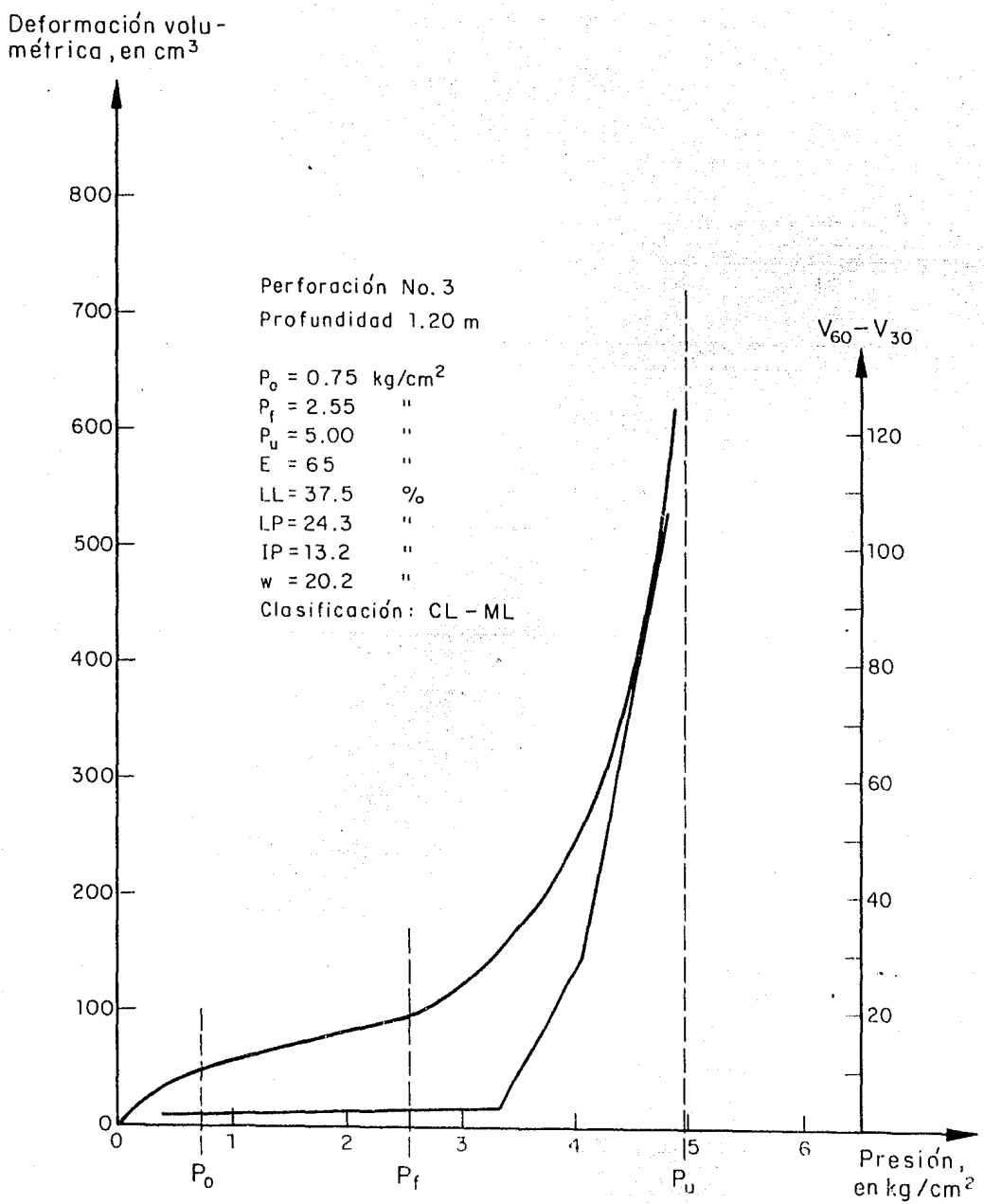

Deformación volumétrica, en cm³
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Perforación No. 3
Profundidad 1.20 m
P₀ = 0.75 kg/cm²
P_f = 2.55 "
P_u = 5.00 "
E = 65 "
LL = 37.5 %
LP = 24.3 "
IP = 13.2 "
w = 20.2 "
Clasificación: CL – ML
V60 – V30
120
100
80
60
40
20
0
1
2
3
4
5
6
P₀
P_f
P_u
Presión, en kg/cm²

Fig 13

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
0.51	0.16	0.20	0.47	21	22	1
1.02	0.16	0.38	0.80	42	44	2
1.53	0.16	0.51	1.18	63	67	4
2.04	0.16	0.63	1.57	91	93	2
2.55	0.16	0.75	1.96	114	119	5
3.06	0.16	0.90	2.32	152	161	9
3.57	0.16	1.11	2.62	215	233	18
3.98	0.16	1.40	2.74	341	381	40
4.39	0.16	1.77	2.78	575	671	96

TABLA 5. Profundidad del ensaye 1.60 m.

Pm kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
0.71	0.08	0.27	0.52	28	29	1
1.53	0.08	0.43	1.18	53	54	1
2.04	0.08	0.53	1.59	68	69	1
2.55	0.08	0.58	2.05	82	83	1
3.06	0.08	0.67	2.47	96	98	2
3.57	0.08	0.73	2.92	113	116	3
4.34	0.08	0.88	3.54	151	157	6
5.20	0.08	1.17	4.11	236	262	26
6.22	0.08	1.60	4.70	385	490	105

TABLA 6. Profundidad del ensaye 0.80 m.

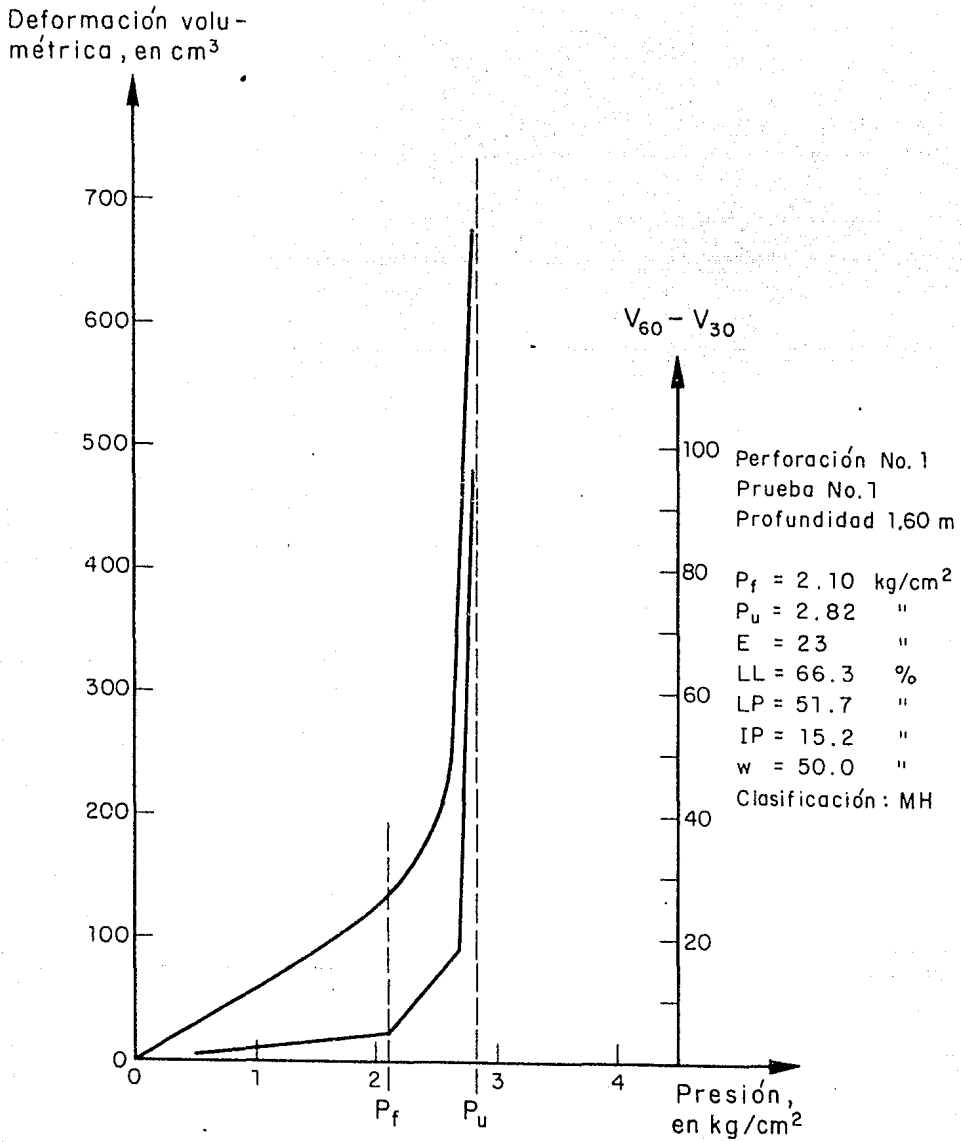

Deformación volumétrica, en cm³
700
600
500
400
300
200
100
0
0
1
2
3
4
P_f
P_u
Presión, en kg/cm²
$V_{60} - V_{30}$
100
80
60
40
20
Perforación No. 1
Prueba No. 1
Profundidad 1.60 m
P_f = 2.10 kg/cm²
P_u = 2.82 "
E = 23 "
LL = 66.3 %
LP = 51.7 "
IP = 15.2 "
w = 50.0 "
Clasificación : MH

Fig 14

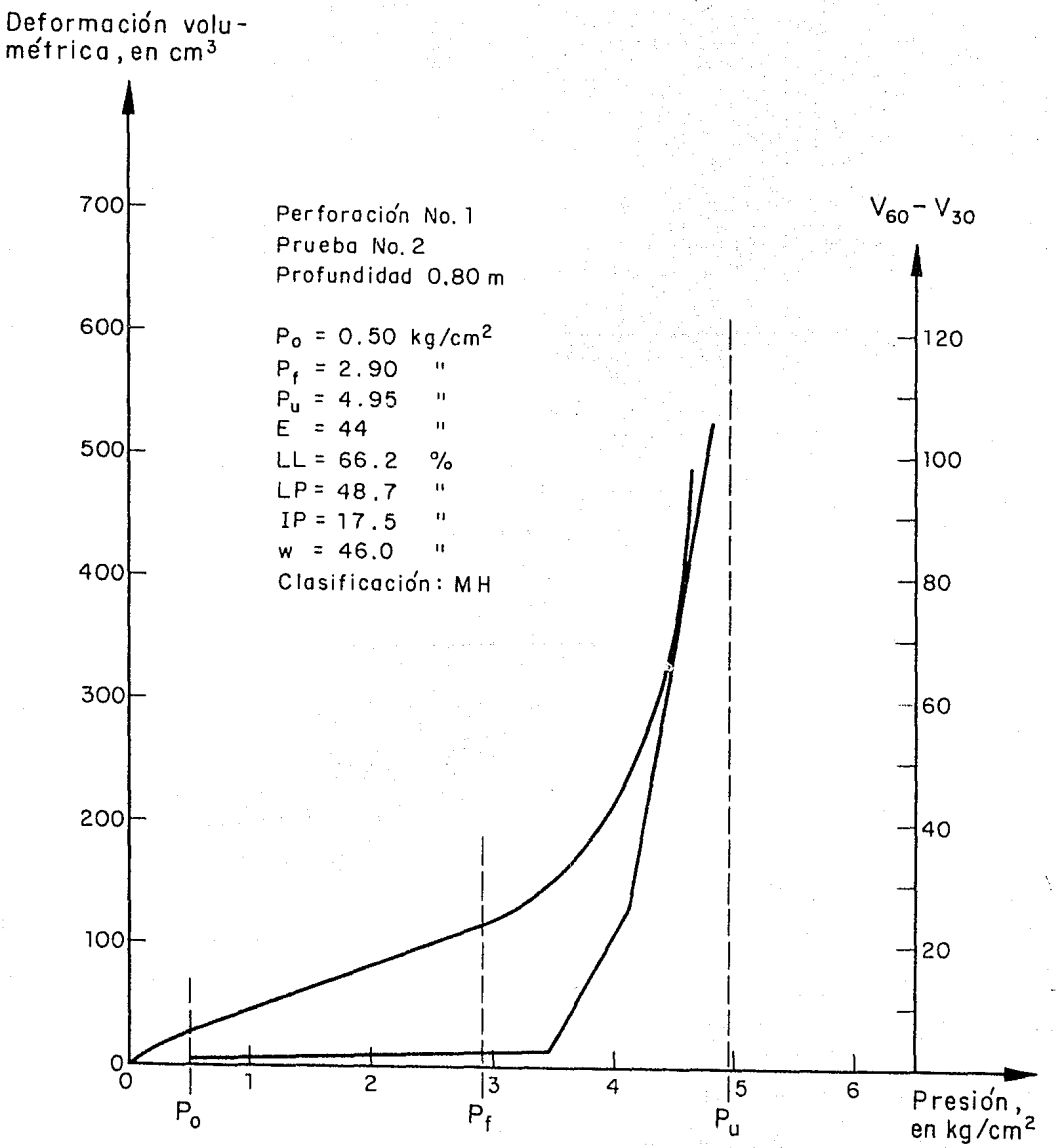

Deformación volumétrica, en cm³
700
600
500
400
300
200
100
0
Perforación No. 1
Prueba No. 2
Profundidad 0.80 m
Po = 0.50 kg/cm²
Pf = 2.90 "
Pu = 4.95 "
E = 44 "
LL = 66.2 %
LP = 48.7 "
IP = 17.5 "
w = 46.0 "
Clasificación: MH
V60 - V30
120
100
80
60
40
20
0
1
2
3
4
5
6
Po
Pf
Pu
Presión, en kg/cm²

Fig 15

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
0.71	0.27	0.60	0.38	45	51	6
1.79	0.27	0.70	1.36	121	123	2
2.35	0.27	0.95	1.67	184	191	7
2.83	0.27	1.25	1.85	290	317	27
4.28	0.27			677		

TABLA 7. Profundidad del ensaye 2.70 m.

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
1.02	0.18	0.37	0.83	54	55	1
1.53	0.18	0.51	1.20	79	80	1
2.04	0.18	0.61	1.61	100	101	1
2.55	0.18	0.70	2.03	119	121	2
3.06	0.18	0.86	2.38	159	164	5
3.37	0.18	1.10	2.45	210	242	32
4.28	0.18	1.44	3.02	365	436	71
5.20	0.18			700		

TABLA 8. Profundidad del ensaye 1.80 m.

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
0.51	0.08	0.20	0.39	24	25	1
1.12	0.08	0.30	0.90	41	42	1
1.63	0.08	0.38	1.33	55	57	2
2.14	0.08	0.46	1.76	68	69	1
2.60	0.08	0.51	2.17	79	80	1
3.16	0.08	0.59	2.65	91	95	4
3.77	0.08	0.66	3.19	109	111	2
4.18	0.08	0.75	3.51	128	130	2
4.69	0.08	0.85	3.92	156	162	6
5.30	0.08	1.02	4.36	199	210	11
5.71	0.08	1.15	4.64	252	271	19
6.22	0.08	1.33	4.97	330	359	29
6.73	0.08	1.50	5.31	441	484	43
7.40	0.08	1.65	5.83	599	669	70

TABLA 9. Profundidad del ensaye 0.80 m.

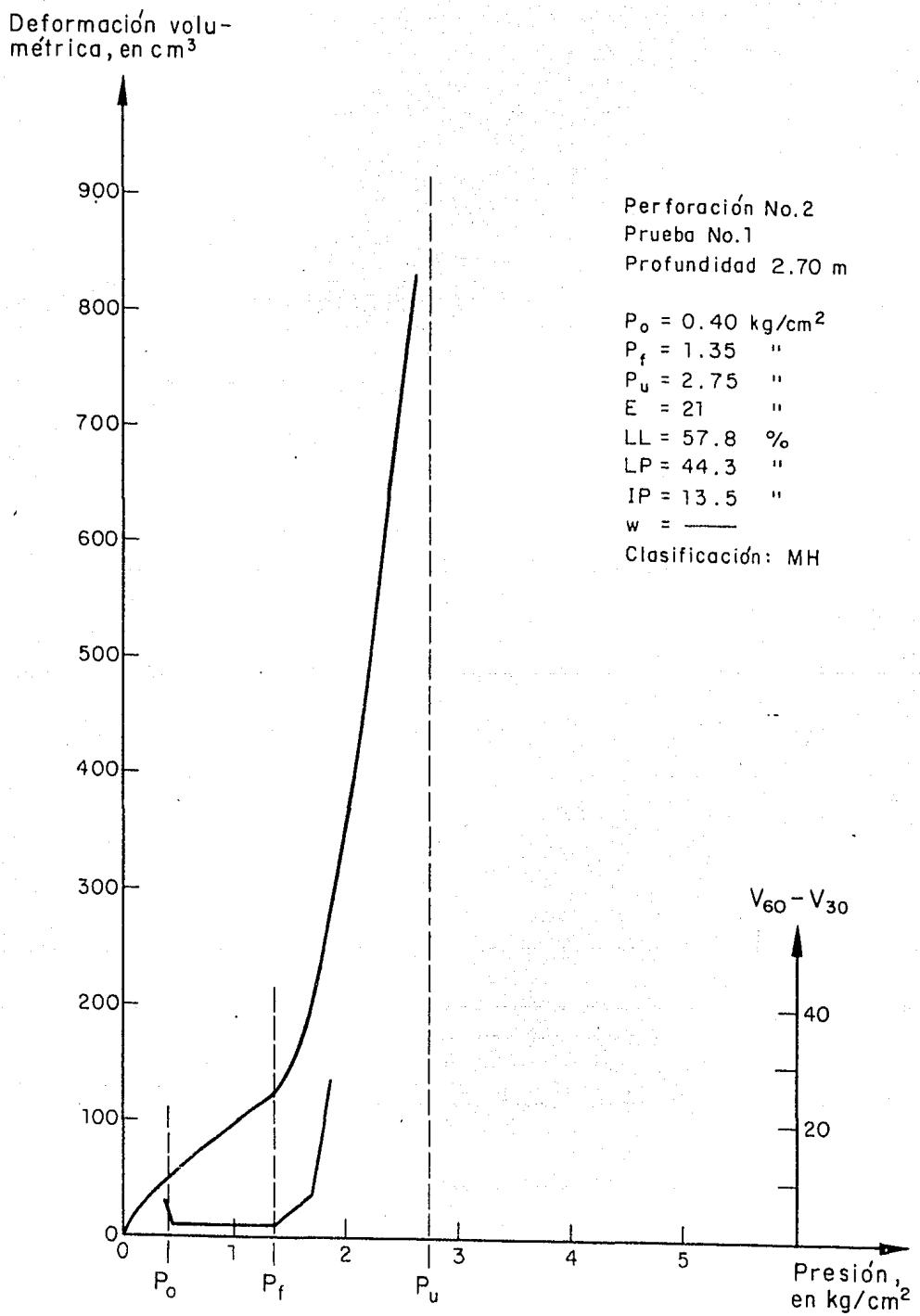

Deformación volumétrica, en cm³
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
1
2
3
4
5
Presión, en kg/cm²
Po
Pf
Pu
Perforación No.2
Prueba No.1
Profundidad 2.70 m
Po = 0.40 kg/cm²
Pf = 1.35 "
Pu = 2.75 "
E = 21 "
LL = 57.8 %
LP = 44.3 "
IP = 13.5 "
w = ——
Clasificación: MH
V60 - V30
40
20

Fig 16

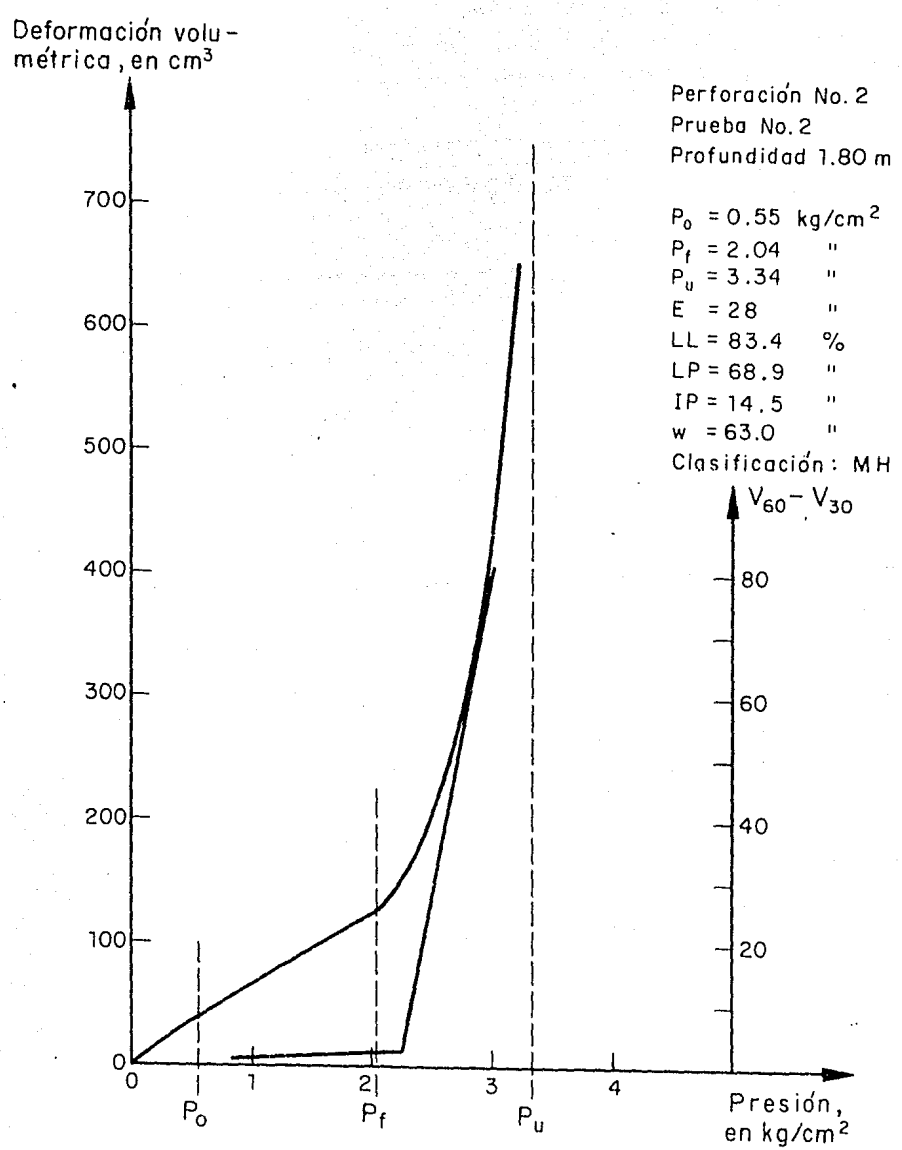

Deformación volumétrica, en cm³
700
600
500
400
300
200
100
0
Perforación No. 2
Prueba No. 2
Profundidad 1.80 m
P_o = 0.55 kg/cm²
P_f = 2.04 "
P_u = 3.34 "
E = 28 "
LL = 83.4 %
LP = 68.9 "
IP = 14.5 "
w = 63.0 "
Clasificación: MH
$V_{60} - V_{30}$
80
60
40
20
0
1
2
3
4
P_o
P_f
P_u
Presión, en kg/cm²

Fig 17

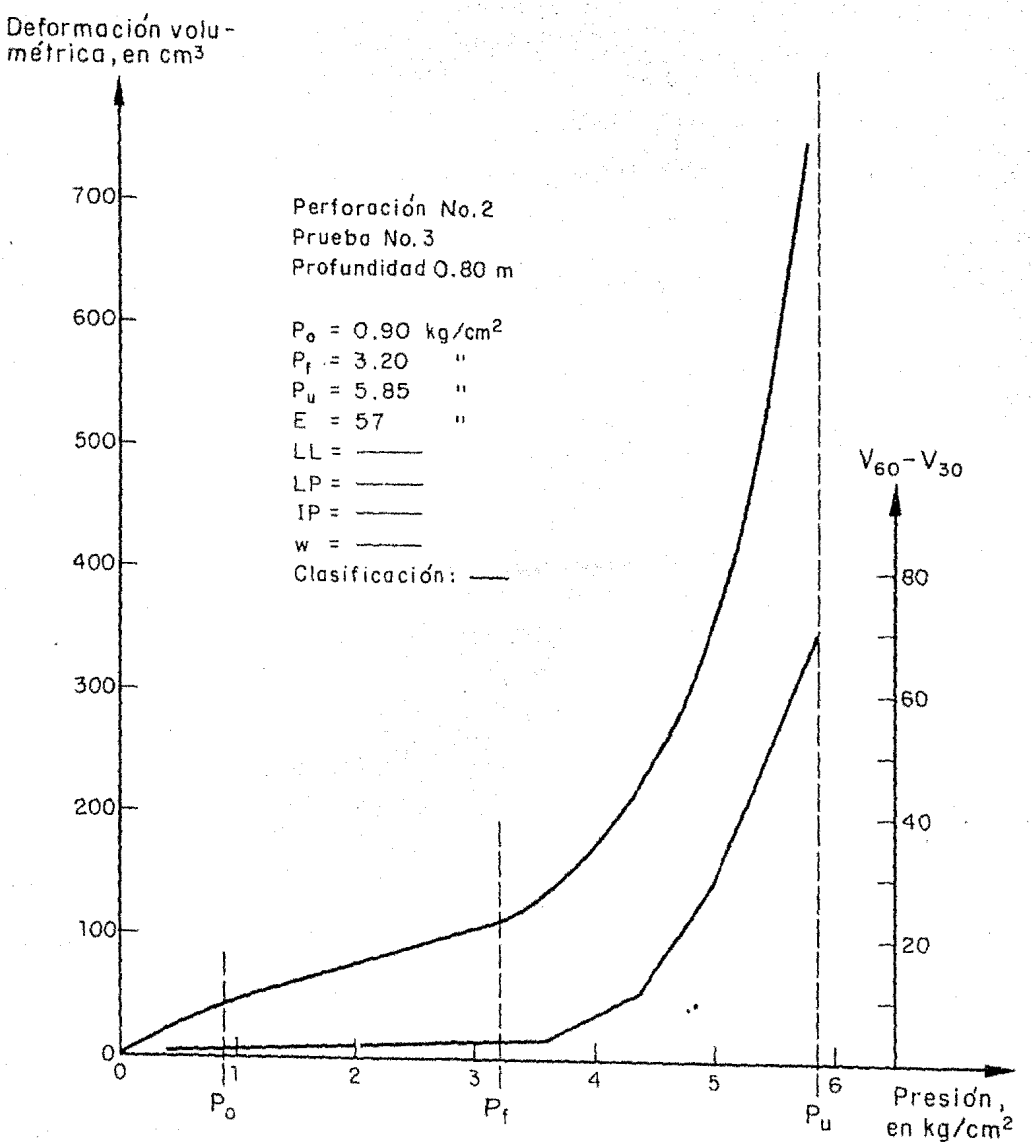

Deformación volumétrica, en cm³
700
600
500
400
300
200
100
0
Perforación No.2
Prueba No.3
Profundidad 0.80 m
P_o = 0.90 kg/cm²
P_f = 3.20 "
P_u = 5.85 "
E = 57 "
LL = ———
LP = ———
IP = ———
w = ———
Clasificación: ——
$V_{60} - V_{30}$
80
60
40
20
0
1
2
3
4
5
6
P_o
P_f
P_u
Presión, en kg/cm²

Fig 18

Pm Kg/cm²	P Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
0.51	0.10	0.34	0.27	43	44	1
1.02	0.10	0.45	0.67	58	60	2
1.53	0.10	0.56	1.07	77	78	1
2.04	0.10	0.65	1.49	93	94	1
2.55	0.10	0.71	1.94	107	108	1
3.06	0.10	0.78	2.38	121	122	1
3.57	0.10	0.86	2.81	136	138	2
4.08	0.10	0.92	3.26	154	155	1
4.59	0.10	1.00	3.69	177	179	2
5.10	0.10	1.11	4.09	209	217	8
5.61	0.10	1.24	4.47	256	269	13
6.12	0.10	1.36	4.86	312	329	17
6.63	0.10	1.54	5.19	392	424	32
7.14	0.10	1.76	5.48	497	533	36
7.65	0.10	2.08	5.67	612	653	41

TABLA 10. Profundidad del ensaye 1.00 m.

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
0.46	0.20	0.55	0.11	74	76	2
1.02	0.20	0.80	0.42	123	125	2
1.53	0.20	0.90	0.83	147	147	0
2.04	0.20	0.96	1.28	168	169	1
2.55	0.20	1.05	1.70	196	197	1
3.06	0.20	1.15	2.11	232	236	4
3.62	0.20	1.32	2.50	296	316	20
4.21	0.20	1.57	2.84	398	438	40
4.59	0.20	1.86	2.93	530	573	43
5.30	0.20			671		

TABLA 11. Profundidad del ensaye 2.00 m.

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
0.71	0.30	0.75	0.26	112	117	5
1.02	0.30	0.92	0.40	153	156	3
1.53	0.30	1.07	0.76	204	207	3
2.04	0.30	1.21	1.13	257	260	3
2.55	0.30	1.41	1.44	338	358	20
3.06	0.30	1.75	1.61	476	524	48
3.57	0.30	2.10	1.77	631	666	35

TABLA 12. Profundiad del ensaye 3.00 m.

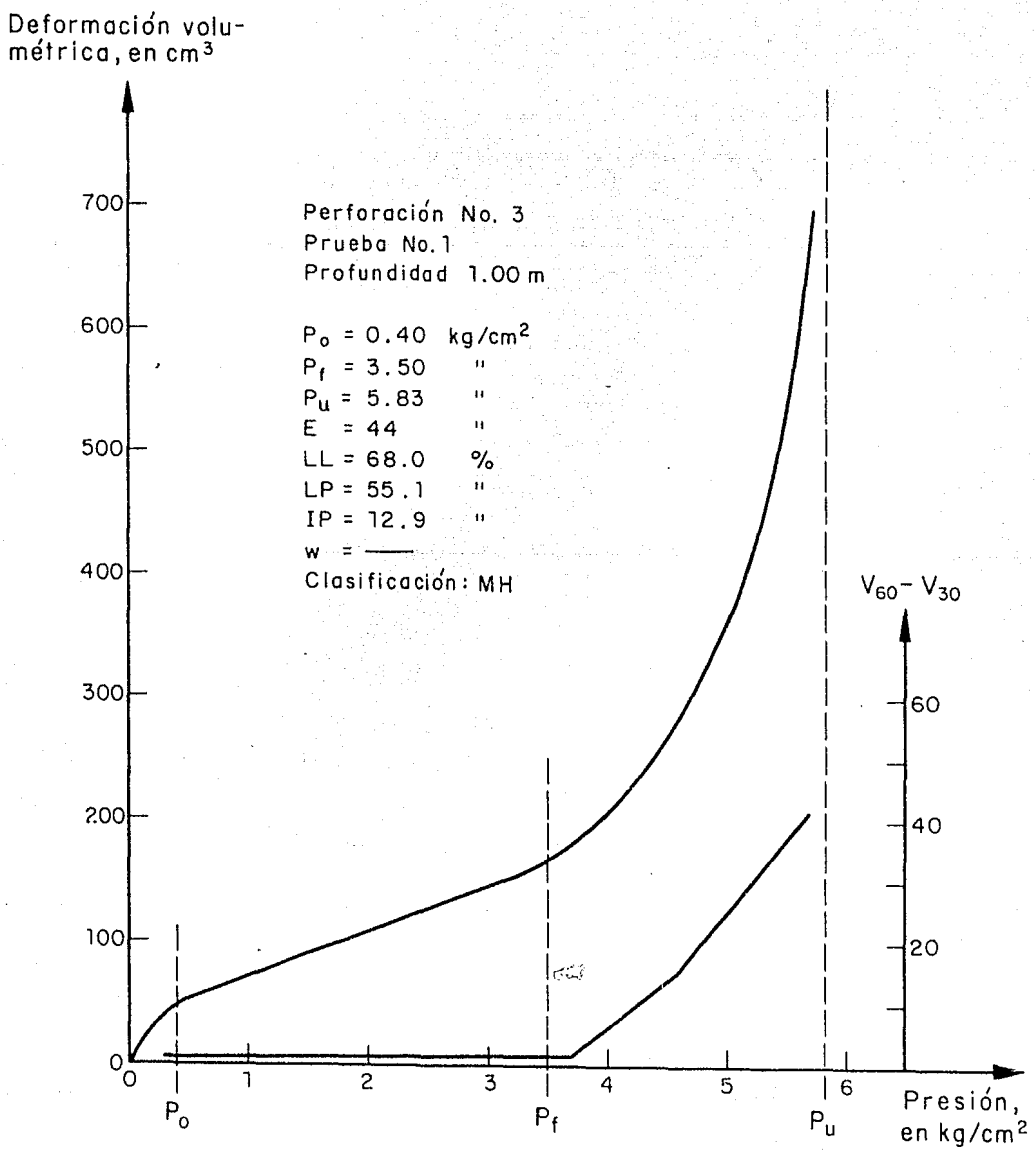

Deformación volumétrica, en cm³
700
600
500
400
300
200
100
0
Perforación No. 3
Prueba No. 1
Profundidad 1.00 m
Po = 0.40 kg/cm²
Pf = 3.50 "
Pu = 5.83 "
E = 44 "
LL = 68.0 %
LP = 55.1 "
IP = 12.9 "
w = ——
Clasificación: MH
V60 - V30
60
40
20
0
1
2
3
4
5
6
Po
Pf
Pu
Presión, en kg/cm²

Fig 19

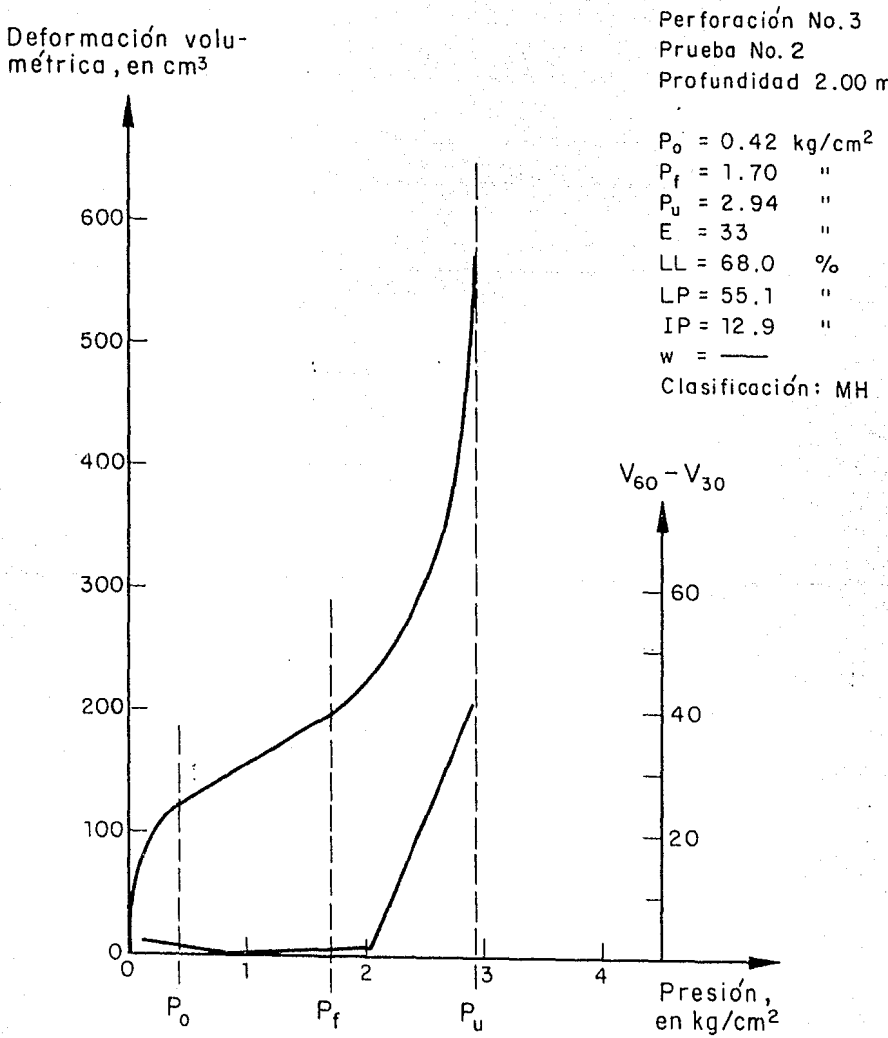
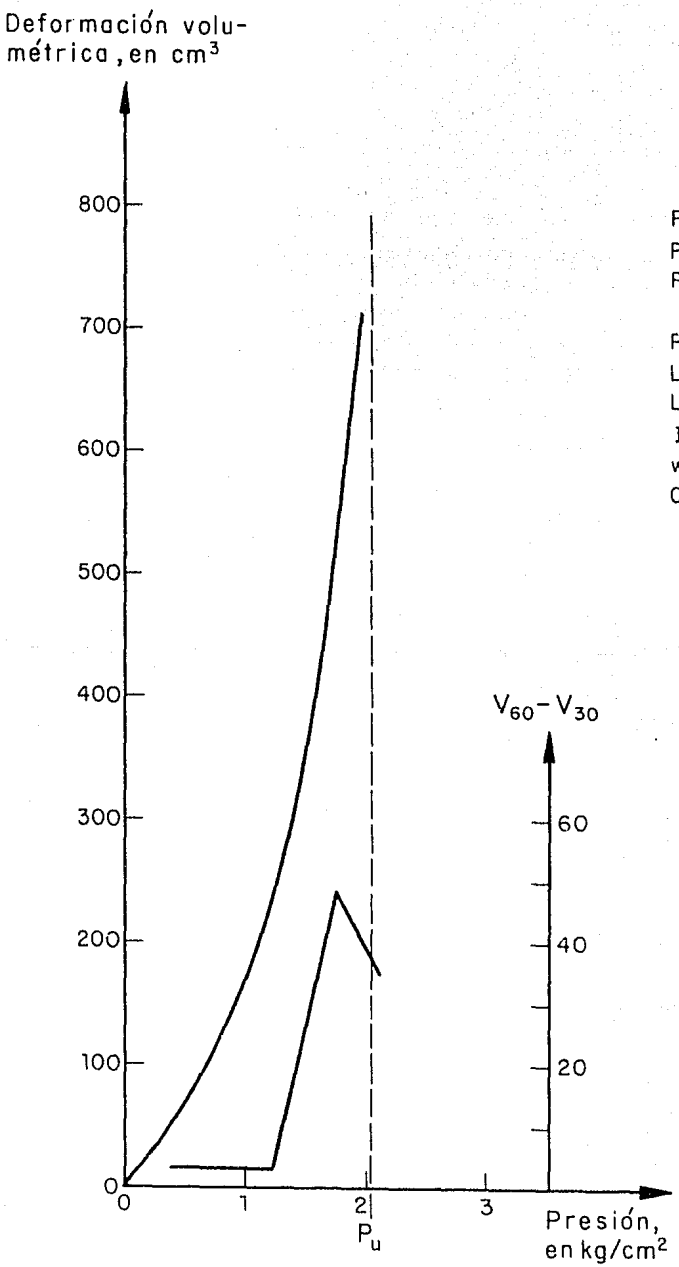

Deformación volumétrica, en cm³
600
500
400
300
200
100
0
0
1
2
3
4
P_o
P_f
P_u
Presión, en kg/cm²
$V_{60} - V_{30}$
60
40
20
Perforación No. 3
Prueba No. 2
Profundidad 2.00 m
P_o = 0.42 kg/cm²
P_f = 1.70 "
P_u = 2.94 "
E = 33 "
LL = 68.0 %
LP = 55.1 "
IP = 12.9 "
w = ——
Clasificación: MH

Fig 20



Perforación No. 3
Prueba No. 3
Profundidad 3.00 m

P_u = 2.05 kg/cm²
LL = 68.0 %
LP = 55.1 "
IP = 12.9 "
w = 55.0 "
Clasificación: MH

Fig 21

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³
0.51	0.10	0.21	0.40	26	27
1.02	0.10	0.36	0.76	45	46
1.53	0.10	0.46	1.17	62	62
2.04	0.10	0.54	1.60	73	73
2.60	0.10	0.60	2.10	86	87
3.06	0.10	0.67	2.49	99	100
3.57	0.10	0.75	2.92	113	115
4.08	0.10	0.79	3.39	133	135
4.64	0.10	0.94	3.80	159	162
4.08	0.10	0.94	3.24	163	163
3.57	0.10	0.94	2.73	163	163
3.06	0.10	0.94	2.22	161	160
2.55	0.10	0.91	1.74	153	153
2.04	0.10	0.86	1.28	142	141
1.53	0.10	0.82	0.81	129	127
2.55	0.10	0.85	1.80	140	140
3.57	0.10	0.91	2.76	154	155
4.64	0.10	1.00	3.74	175	180
5.61	0.10	1.20	4.51	241	256
6.17	0.10	1.36	4.91	308	330
6.68	0.10	1.55	5.23	392	423
7.24	0.10	1.75	5.59	493	527
7.85	0.10	2.08	5.87	607	651

TABLA 13. Profundidad del ensaye 1.00 m.

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
1.02	0.20	0.27	0.95	35	36	1
2.04	0.20	0.50	1.74	65	67	2
3.06	0.20	0.70	2.56	104	107	3
4.08	0.20	1.16	3.12	206	239	33
5.10	0.20	1.71	3.59	426	512	86
5.76	0.20			652		

TABLA 14. Profundidad del ensaye 2.00 m.

Pm Kg/cm²	Pz Kg/cm²	P(V) Kg/cm²	P Kg/cm²	V_{30} cm³	V_{60} cm³	$V_{60} - V_{30}$ cm³
0.46	0.30	0.37	0.39	47	48	1
0.77	0.30	0.59	0.48	80	83	3
1.12	0.30	0.74	0.68	108	110	2
1.58	0.30	0.91	0.97	151	155	4
2.04	0.30	1.14	1.20	215	227	12
2.65	0.30	1.48	1.47	338	393	55
3.11	0.30	1.86	1.55	518	570	52
3.32	0.30			630		

TABLA 15. Profundidad del ensaye 3.00 m.

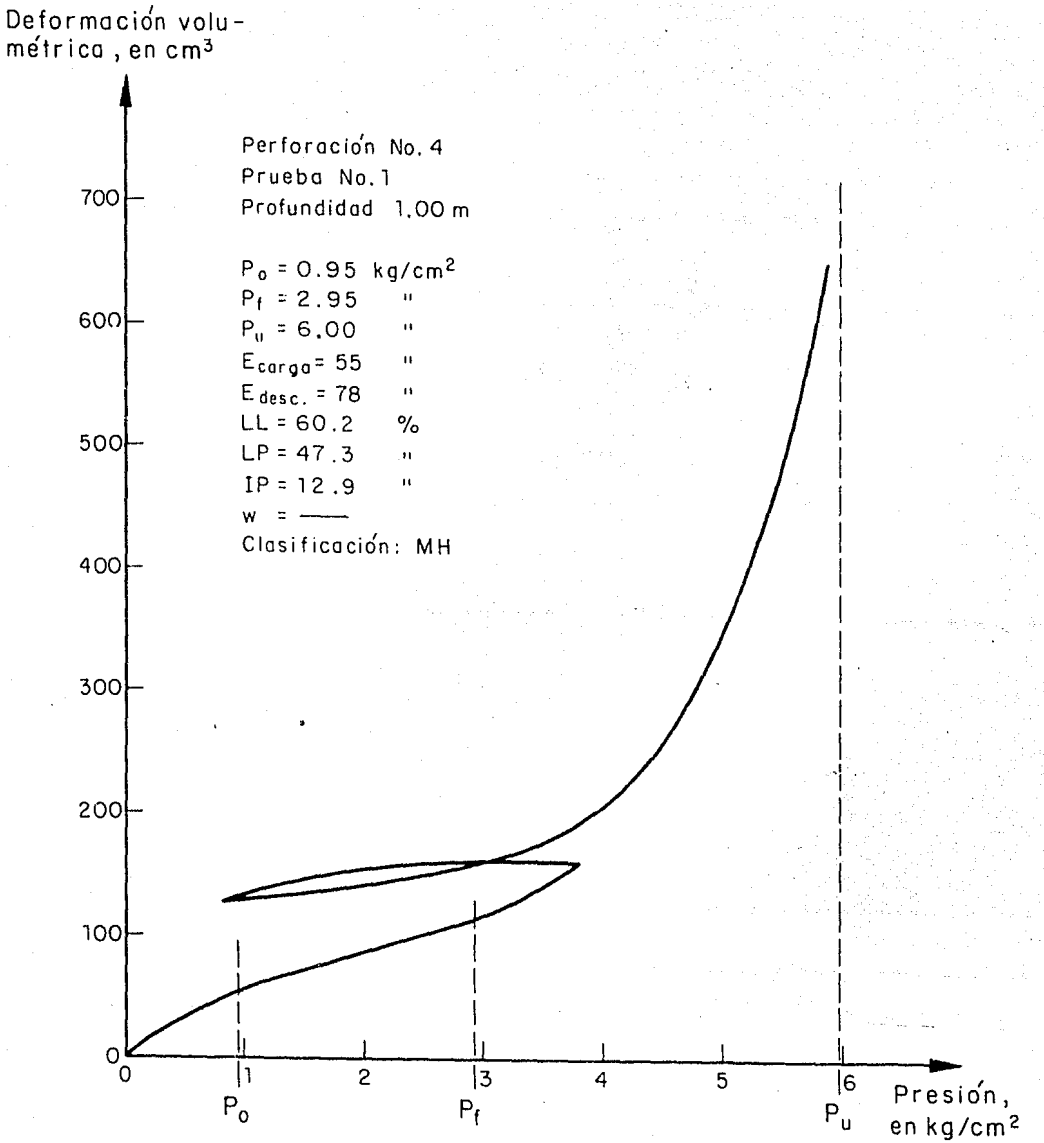

Deformación volumétrica, en cm³
Perforación No. 4
Prueba No. 1
Profundidad 1.00 m
P_o = 0.95 kg/cm²
P_f = 2.95 "
P_u = 6.00 "
E_{carga} = 55 "
$E_{desc.}$ = 78 "
LL = 60.2 %
LP = 47.3 "
IP = 12.9 "
w = ——
Clasificación: MH
700
600
500
400
300
200
100
0
0
1
2
3
4
5
6
P_o
P_f
P_u
Presión, en kg/cm²

Fig 22

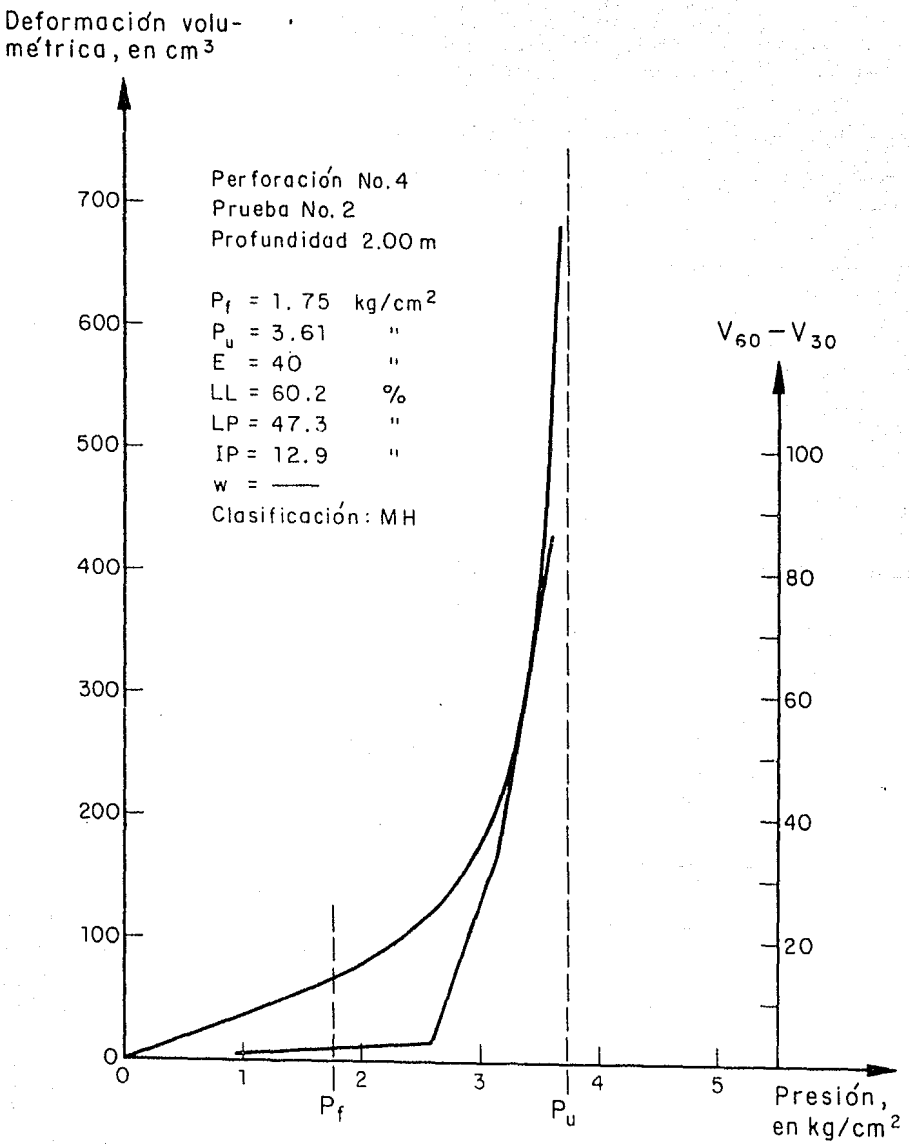
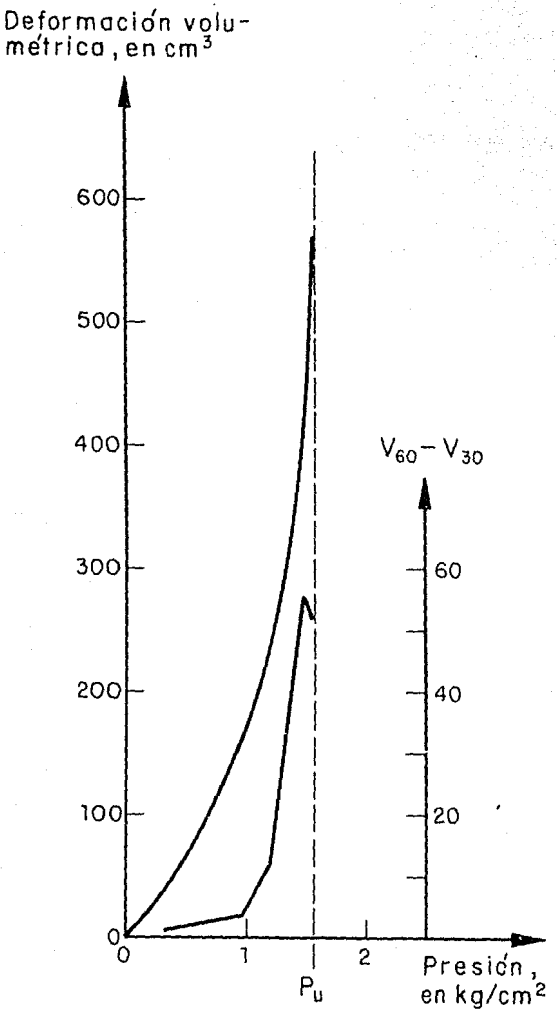

Deformación volumétrica, en cm³
Perforación No. 4
Prueba No. 2
Profundidad 2.00 m
P_f = 1.75 kg/cm²
P_u = 3.61 "
E = 40 "
LL = 60.2 %
LP = 47.3 "
IP = 12.9 "
w = ——
Clasificación: MH
$V_{60} - V_{30}$
700
600
500
400
300
200
100
0
100
80
60
40
20
0
1
2
3
4
5
P_f
P_u
Presión, en kg/cm²

Fig 23



Perforación No. 4
Prueba No. 3
Profundidad 3.00 m

P_u = 1.55 kg/cm²
LL = 60.2 %
LP = 47.3 "
IP = 12.9 "
w = 50.5 "
Clasificación: MH

Fig 24

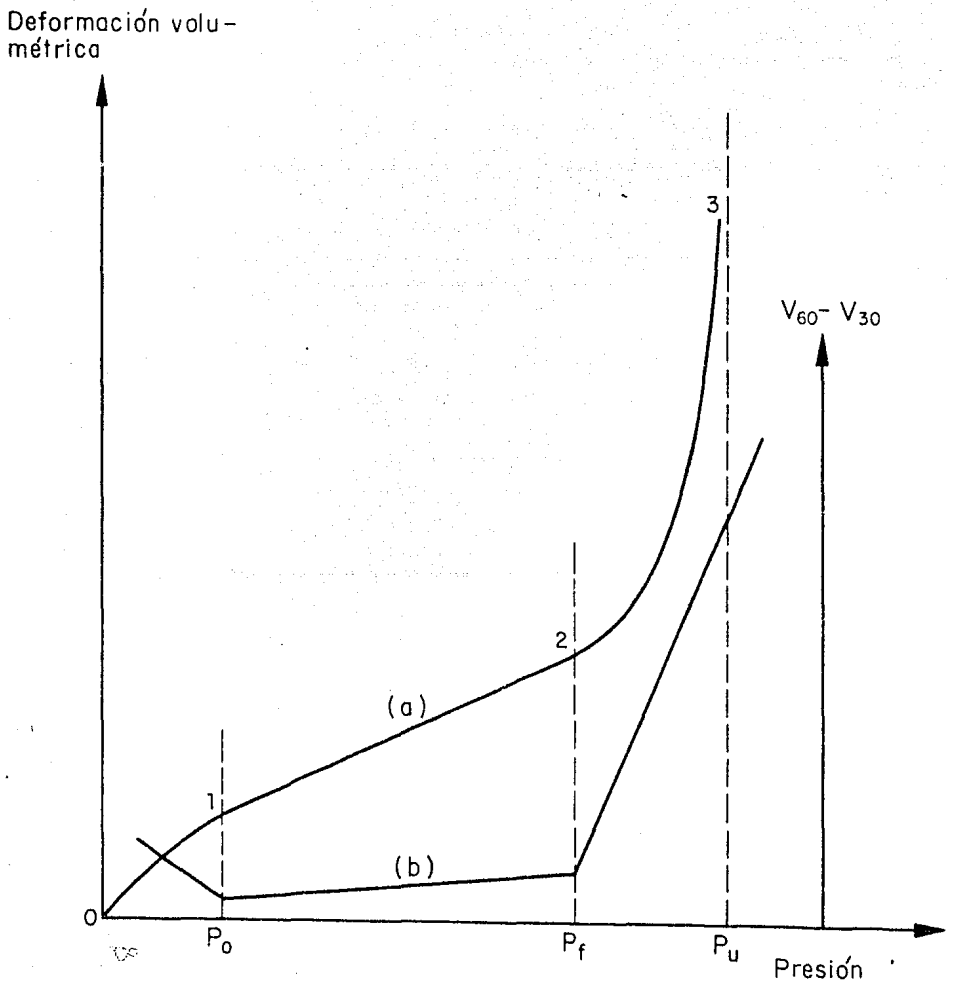


Fig 25. Curvas presiométricas típicas

Por último, se entra en el tercer tramo (de 2 a 3), a lo largo del cual la pendiente de la curva se va incrementando notablemente, lo cual indica que el material se ha ido plastificando, hasta que ocurre la falla.

Los resultados que se obtienen de esta curva presiométrica y que tienen interés en la ingeniería civil son los siguientes:

El valor Po que es la presión del material en estado de reposo, es decir, es el momento en que el material adquiere esfuerzos equivalentes a aquellos que tenía antes de hacerse la perforación (punto 1).

En el tramo seudo-elástico es importante el módulo de deformación del material o módulo elástico de Ménard (E), que se relaciona directamente con la pendiente de este tramo. Algunas veces esta pendiente puede variar considerablemente como en el caso de las arcillas preconsolidadas y de algunas arenas.

La ecuación que relaciona el módulo de deformación con las presiones aplicadas a la perforación y los volúmenes leídos en el volúmetro, se deduce a continuación:

Se parte de la fórmula de Lamé, que define el módulo de deformación como:

$$E = (1 + \nu) \, r_o \, dp / dr \qquad \ldots (1)$$

donde:

ν = módulo de Poisson. Los demás símbolos de la ecuación están representados en la siguiente figura :

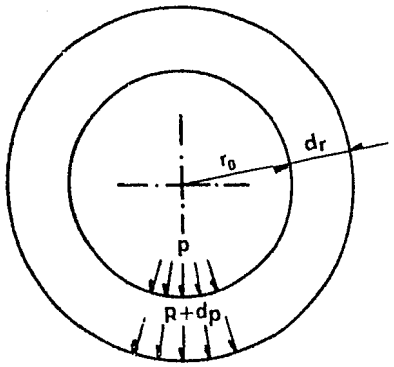


Fig 26. Expansión de la perforación.

El incremento de volumen es:

$$dV = \pi L (r_o + dr)^2 - \pi L r_o^2$$

L = altura de la sonda.

Despreciando el valor dr^2,

$$dV = 2\pi L r_o dr \qquad \ldots . (2)$$

Despejando dr de la ecuación (1) y sustituyendo en la (2), queda:

$$dV = 2\pi L r_o^2 \frac{1+\nu}{E} dp$$

Pero $\pi L r_o^2$ es el volumen inicial, que en este caso está dado por el volumen de la sonda sin presión (Vo) y el aumento de volumen (Vm), hasta que se alcanzó r_o . Por lo tanto, el módulo de deformación se calcula con la siguiente expresión:

$$E = 2(1+\nu)(Vo + Vm)\ dp/dV \qquad \ldots . (3)$$

El valor de ν para la mayor parte de los suelos, es 0,33 ; valor que

adopta Ménard para el cálculo de E.

Vo es un valor constante para cada tipo de sonda. Para la de 44 mm de diámetro y 37 mm de altura de la celda central de medición, Vo = 563 cm^3. Para la sonda de 58 mm de diámetro y 21 mm de altura de la celda central de medición, Vo = 555 cm^3.

Los valores de Vm y dp/dV se obtienen directamente de la curva presiométrica (a). El valor dp/dV es el inverso de la pendiente en el tramo seudo-elástico y Vm es, como regla general, el valor del volumen medio en dicho tramo.

Otros resultados de interés son los siguientes:

La presión de fluencia (P_f) que es la suficiente para que el material pase del estado elástico al plástico y la presión última o de falla (Pu), que es la presión máxima que puede resistir el material estudiado.

En la tabla 16 se presentan intervalos de valores de E y Pu para algunos tipos de materiales.

Se puede calcular también con los datos arrojados por las curvas presiométricas, el coeficiente de fluencia fc que es el porcentaje de deformación diferencial con respecto a la deformación total para un incremento de presión dado y se calcula con la siguiente expresión:

$$f_c = \frac{V_{60}\ (n) - V_{30}\ (n)}{V_{60}\ (n) - V_{60}\ (n-1)}$$

donde:

$V_{30}\ (n)$ y $V_{60}\ (n)$ son los volúmenes leídos a los 30 y 60 seg para una determinada presión Pn y $V_{60}\ (n-1)$ es el volumen leído a los 60 seg para la presión $P_{n-1} < P_n$, correspondiente al incremento de presión anterior en

Tipo de suelo	E (en bars)	Pu (en bars)
Turbas	2 - 15	0.2 - 1.5
Arcillas blandas	5 - 30	0.5 - 3.0
Arcillas plásticas	30 - 80	3.0 - 8.0
Arcillas duras	80 - 400	6.0 - 20.0
Marga	50 - 1000	6.0 - 60.0
Arenas limosas	5 - 20	1.0 - 5.0
Limos	20 - 100	2.0 - 15.0
Arenas y gravas	80 - 1000	12.0 - 50.0
Arenas sedimentarias	75 - 400	10.0 - 50.0
Rocas calcáreas	800 - 200,000	30.0 a más de 100.0
Terraplenes recientes	5 - 10	0.5 - 3.0
Terraplenes antiguos	40 - 150	4.0 - 10.0
Terraplenes recientes de gravas bien compactados.	100 - 150	10.0 - 25.0

Tabla 16. Intervalos de valores del módulo de deformación (E) y de la presión última (Pu), de algunos tipos de suelos (ref 2).

el ensaye.

Este valor es usado para preveer la evolución de los asentamientos con - el tiempo. Los asentamientos diferidos de una estructura son mayores a medida que fc crece.

Este valor también corresponde con el volumen obtenido de la curva de fluencia (curva (b) de la fig 25), para la presión media del tramo elástico.

La segunda curva presiométrica (curva (b)) o curva de fluencia, tiene la peculiaridad de presentar tres tramos rectos. La intersección de los dos primeros - corresponde a la presión de reposo del material (Po) y la de los dos tramos siguientes a la presión de fluencia (P_f).

En algunos tipos de construcciones sujetas a ciclos de carga y descarga, como es el caso de los caminos, cimentaciones de máquinas, etc. es importante conocer el comportamiento del subsuelo mediante pruebas que reproduzcan este fenómeno. Para ello se pueden hacer pruebas con ciclos de carga y descarga para conocer la relación entre los módulos de deformación en cada condición. La relación $\frac{E\ desc}{E\ carga}$ es un valor característico del tipo de suelo. Valores entre 2 y 3 se encuentran en los - suelos arcillosos y de 3 a 6 en los limos y arenas (ref 3).

Es importante señalar que para encontrar el módulo de deformación en la descarga, no debe rebasarse mucho la presión de fluencia del material durante la carga. Este requisito es debido al comportamiento de la columna de agua en el volúmetro.

Otro valor característico del tipo de suelo es la relación E / Pu. Valores altos de 12 a 30 se encuentran en arcillas preconsolidadas y pequeños entre 5 y 8 en suelos aluviales. Comunmente la relación está entre 8 y 12 (ref 2).

4.2 Análisis de las curvas presiométricas obtenidas.

En el capítulo 3 se presentaron las curvas presiométricas determinadas en diversas perforaciones en los terraplenes de la Pista Circular del Instituto de Ingeniería (figs 11, 12 y 13) y del ramal Oriente del camino Vialidad Sur de la Ciudad de México, tramo entronque Boulevad La Luz-Ajusco (fig 14 a 24).

En el caso del terraplén de prueba de la Pista Circular, se puede observar que los módulos de deformación (E) fueron de 163, 131 y 65 Kg/cm^2 y las presiones últimas (Pu) respectivas de 8.2, 6.43 y 5.0 Kg/cm^2. Estos valores pueden compararse con los presentados en la Tabla 16, considerando a este terraplén como antiguo. Se nota que solo el primer valor de E sale fuera del intervalo establecido en dicha tabla para los valores de E y Pu.

En la tabla 17 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en este terraplén.

En cuanto a los resultados de los ensayes en el ramal Oriente del camino Vialidad Sur de la Ciudad de México, que es un terraplén nuevo, todos los valores del módulo de deformación E son superiores al intervalo dado en la Tabla 16. Los valores de Pu también son superiores al intervalo dado en la tabla excepto en algunos casos. Se nota que los valores de Pu disminuyen a medida que aumenta la profundidad del ensaye.

En las perforaciones 3 y 4, el ensaye se hizo a 3.0 m de profundidad y se notó que el material no presenta ninguna resistencia a la expansión de la sonda, según se puede observar en las figs 21 y 24. En ambos casos desaparecieron los dos primeros tramos de la curva presiométrica y solo aparece el tramo de fluencia.

En la perforación N° 4, prueba N° 1, se realizó un ensaye de carga y

	Po Kg/cm²	P_f Kg/cm²	Pu Kg/cm²	E Kg/cm²	E/Pu	Tipo de Material (SUCS)	Contenido de agua (%)
Perf. 1 Prof. 1.20 m.	1.75	4.95	8.20	163	19.9	CL - ML	20.0
Perf. 2 Prof. 1.20 m.	1.45	3.90	6.43	131	20.4	CL - ML	20.5
Perf. 3 Prof. 1.20 m.	0.75	2.55	5.00	65	13.0	CL - ML	20.2

TABLA 17. Resumen de los resultados experimentales en la Pista Circular de la Sección de Vías terrestres del Instituto de Ingeniería.

	Po Kg/cm²	P_f Kg/cm²	Pu Kg/cm²	E Kg/cm²	E/Pu	E desc / E carga	Tipo de Material (SUCS)	Contenido de agua (%)
Perf. 1 Prof. 0.80 m.	0.50	2.90	4.95	44	8.9	-	MH	46.0
Perf. 1 Prof. 1.60 m.	-	2.10	2.82	23	8.2	-	MH	50.0
Perf. 2 Prof. 0.80 m.	0.90	3.20	5.85	57	9.7	-	-	-
Perf. 2 Prof. 1.80 m.	0.55	2.04	3.34	28	8.4	-	-	63.0
Perf. 2 Prof. 2.70 m.	0.40	1.35	2.75	21	7.6	-	-	-
Perf. 3 Prof. 1.00 m.	0.40	3.50	5.83	44	7.5	-	MH	-
Perf. 3 Prof. 2.00 m.	0.42	1.70	2.94	33	11.2	-	MH	-
Perf. 3 Prof. 3.00 m.	-	-	2.05	-	-	-	MH	55.5
Perf. 4 Prof. 1.00 m.	0.95	2.95	6.00	55	9.2	1.42	MH	-
Perf. 4 Prof. 2.00 m.	-	1.75	3.61	40	11.1	-	MH	-
Perf. 4 Prof. 3.00 m.	-	-	1.55	-	-	-	MH	50.5

TABLA 18. Resumen de los resultados experimentales en el Km 0 + 800 del ramal Oriente del camino Vialidad Sur de la Ciudad de México, tramo entronque Boulevar La Luz-Ajusco.

descarga, obteniéndose una relación de 1.42 entre el módulo de deformación durante la descarga (E desc) y el de carga (E carga). Este valor es difernte del que se - presenta en la ref 3, en la cual se observa que el intervalo de E desc/ E carga pro_ puesto para limos y arenas es de 3 a 6.

En la Tabla 18 se presenta un resumen de resultados obtenidos en este - terraplén.

4.3 Análisis teórico del ensaye.

Diversos autores (ref 4, 5, 6 y 7) presentan análisis teóricos sobre la - plastificación de cavidades cilíndricas. Siguiendo una secuencia similar a la presenta_ da por Vésic (ref 4), se va a valuar, mediante un desarrollo puramente matemático, el radio de la zona de plastificación en un suelo arcilloso saturado cuando se alcanza - la presión última Pu en el material. En el momento de aparecer esta presión, el mate_ rial fluye y de aquí en adelante su deformación es teóricamente infinita a presión - constante.

La baja permeabilidad de las arcillas permite suponer que la deformación se presenta a volumen constante.

En la fig 27 se muestran los esfuerzos actuantes sobre un elemento dife_ rencial de suelo. Si se desprecian las fuerzas de cuerpo, las condiciones de equilibrio en dicho elemento se reducen a:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \qquad \ldots\ldots (1)$$

Por otro lado, la condición de equilibrio límite para un suelo arcilloso es, de acuerdo con el círculo de Mohr (fig 28):

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2c \qquad \ldots\ldots (2)$$

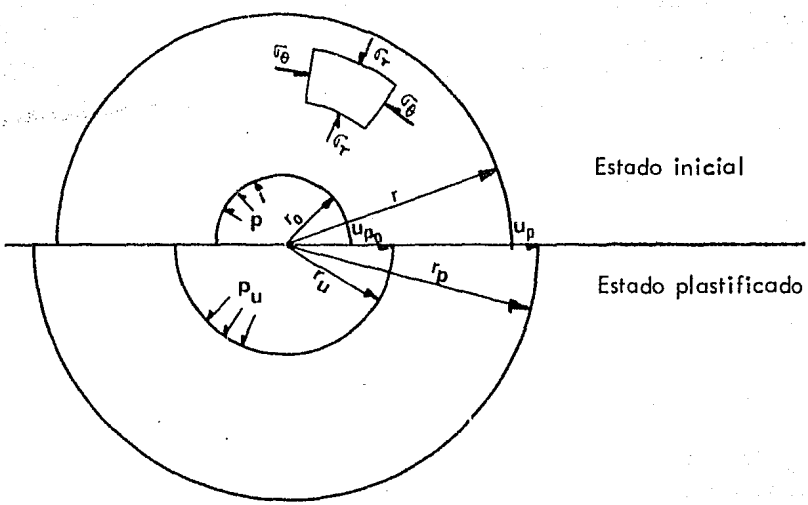


Fig 27. Presiones y deformaciones de una perforación durante el ensaye presiométrico.———

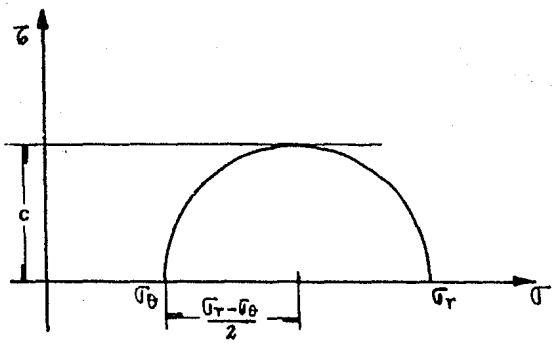


Fig 28. Círculo de Mohr para un suelo puramente cohesivo

donde :

c = resistencia al corte no drenada de la arcilla.

Sustituyendo la ecuación (2) en (1) y resolviendo la ecuación diferencial resultante queda:

$$\sigma_r = -2c \ln r + k \quad \ldots . (3)$$

donde:

k = constante de integración que se valua con la siguiente condición de frontera:

$$\sigma_r = Pu \quad \text{en} \quad r = r_u$$

entonces:

$$k = Pu + 2c \ln r_u$$

Sustituyendo en (3):

$$\sigma_r = Pu - 2c \ln r / r_u \quad \ldots . (4)$$

La ecuación (4) nos da el valor de los esfuerzos radiales en un punto cualquiera de la zona elástica cuando se alcanza el equilibrio límite. En $r = r_p$ el valor de los esfuerzos es:

$$\sigma_p = Pu - 2c \ln r_p / r_u \quad \ldots . (5)$$

Para encontrar la condición de desplazamiento de las partículas del interior de la masa de suelo, se partirá de las relaciones entre esfuerzos y deformaciones que se escriben de la siguiente manera:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_r + \nu \epsilon_\theta) \quad \ldots . (6)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_\theta + \nu \epsilon_r) \quad \ldots . (7)$$

siendo :

$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}$ y $\epsilon_\theta = \frac{u}{r}$

ϵ_r = deformación unitaria en el sentido radial

ϵ_θ = deformación unitaria en el sentido tangencial

u = desplazamiento total en el sentido radial

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación de equilibrio de fuerzas - resulta:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0$$

cuya solución es:

$$u = k_1 r + k_2 / r$$

Sustituyendo esta última en las ecuaciones (6) y (7)

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2}\left[k_1(1+\nu) - \frac{k_2}{r^2}(1-\nu)\right] \quad \ldots\ldots (6')$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2}\left[k_1(1+\nu) + \frac{k_2}{r^2}(1-\nu)\right] \quad \ldots\ldots (7')$$

Particularizando para encontrar el valor de las constantes k_1 y k_2 :

$\sigma_r = -(\sigma_p - Po)$ en $r = r_p$

$\sigma_r = 0$ cuando $r \to \infty$

queda:

$$k_1 = 0$$

$$k_2 = \frac{1+\nu}{E} r_p^2 (\sigma_p - Po)$$

Sustituyendo en el valor de u y particularizando para $u = u_p$ en - $r = r_p$

$$u_p = \frac{1+\nu}{E} r_p (\sigma_p - Po) \quad \ldots\ldots (8)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la (8) queda:

$$u_p = \frac{1+\nu}{E} r_p \left(Pu - 2c \ln r_p / r_u - Po \right) \quad \ldots\ldots (9)$$

Debido a que la deformación de la arcilla saturada ocurre a contenido de agua constante, tomando en cuenta su baja permeabilidad y la corta duración del ensaye, entonces se puede afirmar que no se van a presentar cambios volumétricos al deformarse el material. Por tanto, la relación de volúmenes, da la siguiente ecuación:

$$r_u^2 - r_o^2 = 2 r_p u_p - u_p^2$$

Despreciando u_p^2 por ser muy pequeña queda:

$$r_u^2 = 2 r_p u_p + r_o^2 \quad \ldots\ldots (10)$$

Sustituyendo la ecuación (9) en la (10) resulta:

$$2 \frac{r_p^2}{r_u^2} \frac{(1+\nu)}{E} \left(Pu - 2c \ln \frac{r_p}{r_u} - Po \right) + \frac{r_o^2}{r_u^2} = 1 \quad (11)$$

En la fig **29** se muestra la condición del incremento de los esfuerzos σ_r y σ_θ sin cambio de volumen. Esta condición se deduce de la expresión general:

$$(1 + 2\nu)(\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta) = \Delta V / V$$

Puesto que $\Delta V / V = 0$ queda:

$$\Delta\sigma_r = -\Delta\sigma_\theta$$

es decir, que σ_r y σ_θ aumentan y disminuyen respectivamente respecto a Po en una misma cantidad, hasta llegar a la falla.

Del círculo de Mohr de la fig **29**:

$$\sigma_p = Po + c$$

Sustituyendo σ_p por su valor según la ecuación (5):

$$Pu - 2c \ln r_p / r_u = Po + c$$

Finalmente sustituyendo este valor en la ecuación (11) queda :

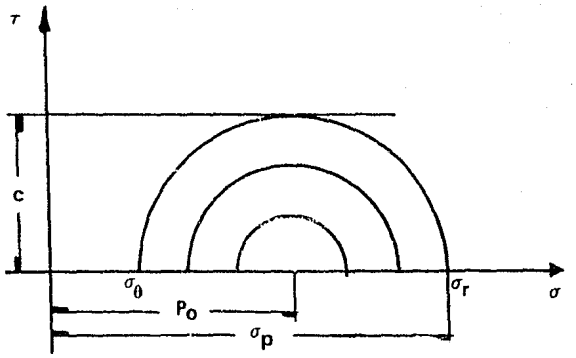


Fig **29** . Incremento de los esfuerzos σ_r y σ_θ durante la aplicación de la presión interior hasta llevarlo a la falla, cuando no hay cambio volumétrico en el material.

$$r_p = \sqrt{\frac{(r_u^2 - r_o^2)\ E}{2(1+\nu)\ c}} \qquad \ldots\ (12)$$

La ecuación (12) permite encontrar la zona de plastificación del material alrededor de la perforación, cuando se aplica la presión última Pu, ya que todos los valores son conocidos.

Esta ecuación es válida solo si el radio r_o es cuando menos de una dimención tal que el volumen de agua que se inyecta en la sonda es suficiente para entrar al tramo seudo-elástico.

CAPITULO 5 APLICACIONES DE LOS RESULTADOS

5.1 Aplicación al análisis de asentamientos.

El parámetro usado para determinar el asentamiento de una estructura, - es el módulo de deformación E.

En el asentamiento de una cimentación influyen dos fenómenos: el de - consolidación que produce un cambio de volumen (debido a la componente volumétri_ ca del tensor de esfuerzos generado en el material en estudio) y un fenómeno de de_ formación a volumen constante (debido a la componente distorsional del tensor de es_ fuerzos).

En la ecuación para el cálculo de asentamientos de una zapata aislada de ancho 2R, cimentada sobre un terreno homogéneo, los dos términos del segundo - miembro son precisamente los asentamientos producidos por la componente distorsional y volumétrica del tensor de esfuerzos respectivamente. Esta ecuación se define de la siguiente manera:

$$W = \frac{1+\nu}{E} P R_o \left(\lambda_2 \frac{R}{R_o}\right)^{\alpha} + \frac{\alpha}{4.5\,E} P \lambda_3 R \qquad \text{para } R > 30 \text{ cm}$$

ó

$$W = \frac{1+\nu}{3\,E} P \lambda^{\alpha} R + \frac{\alpha}{4.5\,E} P \lambda_3 R \qquad \text{para } R \leq 30 \text{ cm}$$

donde:

W = asentamiento total

E = módulo de deformación obtenido de la curva presiométrica

ν = módulo de Poisson

P = presión ejercida por la zapata al nivel de desplante

Ro = una longitud de referencia igual a 30 cm

R = semi-ancho de la cimentación

α = coeficiente que depende de la caractéristica de la estructura del material y de la relación E / Pu. En la Tabla 19 se dan los valores de α.

En el caso de las rocas α adquiere los siguientes valores:

α = 1 / 3 en rocas muy fracturadas

α = 1 / 2 en rocas normales

α = 2 / 3 en rocas poco fracturadas y alteradas

λ_2 y λ_3 = coeficientes de forma que dependen de la relación L / 2 R, donde L es el largo de la cimentación. Valores de λ_2 y λ_3 se presentan en la Tabla 20.

Las dos expresiones para el cálculo de asentamientos solo son válidas para cimentaciones empotradas cuando menos un diámetro en el terreno. En caso contrario, se recomienda aumentar W un 10 % cuando el empotramiento sea menor que un

Tipo de material	Turba		Arcilla		Limo		Arena		Arena y Grava	
	E/Pu	α	E/Pu	α	E/Pu	α	E/Pu	α	E/Pu	α
Sobreconsolidado	-	-	> 16	1	> 14	2/3	> 12	1/2	> 10	1/3
Normalmente consolidado	-	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Alterado	-	-	7- 9	1/2	-	1/2	-	1/3	-	1/4

TABLA 19. Valores de α

L/2R	1		2	3	5	20
	Circular	Cuadrada				
λ_2	1	1.12	1.53	1.78	2.14	2.65
λ_3	1	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50

TABLA 20. Valores de λ_2 y λ_3

diámetro y un 20 % si la cimentación se desplanta en la superficie.

Para terrenos heterogéneos, siempre que las variaciones del módulo de deformación E no sean muy importantes, se puede calcular el asentamiento W. Las expresiones para el cálculo son naturalmente más complicadas e involucran a una serie de coeficientes experimentales, basados en observaciones hechas en diferentes obras. Estas expresiones se pueden ver en la ref 8.

Para el caso de cimentaciones profundas (a partir de una relación $\frac{D}{R}<5$, o en el caso de terrenos heterogéneos $\frac{D_e}{R}<5$, siendo De la profundidad de desplante equivalente que se definirá en 5.2), se puede emplear la expresión siguiente para calcular el asentamiento:

$$W = C_q \frac{1\,5\,q'}{E} \left(\lambda_2 \frac{R}{30}\right)^{\alpha} \quad \text{para } 30 \text{ cm} < R < 100 \text{ cm}$$

ó

$$W = C_q \frac{q'}{2E} \lambda_2^{\alpha} R \qquad \text{para } R \leq 30 \text{ cm}$$

donde :

q' = carga de trabajo de la cimentación

Cq = coeficiente que depende de la profundidad de desplante D (en el caso de terrenos heterogéneos se usa De en vez de D).

$$C_q = \frac{1}{0.8 + 0.1\, D/R}$$

5.2 Aplicación al cálculo de capacidad de carga.

El cálculo de la capacidad de carga requiere del conocimiento previo de la presión última Pu y de la presión en reposo del terreno Po, datos que se obtienen directamente de las curvas presiométricas, como ya se dijo en el capítulo 4.

La experiencia y la teoría muestran que la capacidad de carga última

(q_u) es proporcional a la presión límite Pu. El factor de proporcionalidad depende - del tipo de terreno, de la profundidad de desplante y de la forma de la cimentación. Dicho factor, llamado factor de empotramiento, ha sido fijado en base a numerosos estudios teóricos y experimentales.

En un terreno homogéneo la capacidad de carga última está dada por la siguiente expresión:

$$q_u - q_o = k (Pu - Po)$$

donde además de los símbolos ya definidos, aparece q_u que es la presión vertical en reposo del terreno al nivel de la base de la zapata después de la construcción.

En la Tabla 21 se encontrarán los valores recomendados para el factor de empotramiento k, para diferentes tipos de suelos, divididos en las categorías I, II, III y IV (Tabla 22).

Cuando el terreno es estratificado, en lugar de la presión última Pu se - usa el valor de la presión última equivalente (Pu_e) y en vez de la profundidad de - desplante D, la profundidad de desplante equivalente De. El primer valor es la media geométrica de tres valores y se calcula de la manera siguiente:

$$Pu_e = \sqrt[3]{Pu_1 \cdot Pu_2 \cdot Pu_3}$$

donde:

Pu_1 = presión última a una distancia 2 R arriba del nivel de desplante de la cimentación,

Pu_2 = presión última al nivel de desplante de la cimentación,

Pu_3 = presión última a una distancia 2 R abajo del nivel de desplante de la cimentación.

$\frac{D}{2R}$	Zapatas cuadradas				Zapatas corridas			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
0.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
0.5	1.3	1.5	1.9	2.1	1.0	1.1	1.2	1.3
1.0	1.6	1.8	2.5	2.8	1.2	1.3	1.4	1.6
1.5	1.8	2.1	3.0	3.3	1.2	1.4	1.6	1.8

(a)

Categoría	Pilote con perforación previa	Pilote hincado "in situ"
I	1.8	2.0
II	3.2	3.6
III	5.2	5.8
IV	7.0	9.0

(b)

TABLAS 21. Valores de k usados en el cáculo de capacidad de carga de cimentaciones, cuando el suelo es homogéneo. D es la profundidad de desplante y R el semiancho del cimiento.

Categoría	Suelos	Presión última (en bars)
I	Arcillas	0 - 12
	Limos	0 - 7
II	Arcillas duras y Margas	18 - 40
	Limos compactos	12 - 30
	Arenas compresibles	4 - 8
	Rocas blandas	10 - 30
III	Arenas y gravas	10 - 20
	Rocas	40 - 100
IV	Arenas y gravas muy compactas	30 - 60

TABLA 22. Categorías de suelos.

Siendo 2 R el ancho de la cimentación.

Cuando el ancho de la cimentación es mayor que un metro, cada uno de los tres valores son las medias geométricas de los valores medidos en cada capa de terreno de la forma siguiente:

de $+3R$ a $+R$ arriba del nivel de desplante para Pu_1

de $+R$ a $-R$ a cada lado del nivel de desplante para Pu_2

de $-R$ a $-3R$ abajo del nivel de desplante para Pu_3

Si la cimentación está muy superficial, no interviene Pu_1 en los cálculos y la presión última equivalente es:

$$Pu_e = \sqrt{Pu_2 \cdot Pu_3}$$

En estas reglas las diferencias entre Pu_1, Pu_2 o Pu_3 no deben ser mayores de $\pm 30\,\%$ de Pu_e. En caso contrario, es necesario examinar con más prudencia el problema.

La profundidad de desplante equivalente es:

$$De = \frac{1}{Pu_e} \int_0^h Pu\,(z)\,dz$$

La integral se toma desde la superficie libre del terreno hasta el nivel de desplante de la cimentación.

Para calcular la capacidad de carga admisible se acepta un coeficiente de seguridad de 3, aplicado al factor de empotramiento.

CAPITULO 6 CONCLUSIONES

El presiométro de Ménard es un aparato de manejo relativamente sencillo y fácilmente transportable al sitio del ensaye. Las pruebas a lo largo de la perforación pueden hacerse en poco tiempo, y los resultados, es decir, las características esfuerzo-deformación se pueden obtener inmediatamente.

Estas ventajas sumadas a la de que la prueba se hace directamente en el sitio, hacen que el aparato y el método sean muy atractivos.

Se debe mencionar también, que los esfuerzos transmitidos por la sonda afectan un volumen grande de suelo. Por tanto, los resultados obtenidos están influidos por la estructura secundaria del suelo como las grietas por contracción o los planos naturales de falla y cualquier otro sistema de fallas, lo cual es otro punto a favor de este aparato. Sin embargo conviene observar que el campo de esfuerzos generado por la sonda es muy diferente del inducido por una cimentación. Esta limitación no es más seria que las existentes al emplear resultados de pruebas de resistencia a

la compresión no confinada, las triaxiales o las de consolidación.

También existe cierta incertidumbre sobre el empleo de los resultados presiométricos en el análisis de asentamientos y en el cálculo de la capacidad de carga de cimentaciones debido a que los ensayes presiométricos miden las características esfuerzo-deformación de los materiales en sentido horizontal y las cargas transmitidas por las obras de ingeniería generalmente se hacen en sentido vertical. Es bien sabido que en muchos casos, las características de los suelos son diferentes en ambos sentidos y esta situación trae como consecuencia consideraciones erróneas en los cálculos del asentamiento y la capacidad de carga.

Quizá para determinados tipos de suelos (los que presenten características muy semejantes en ambos sentidos), el método pueda ser confiable pero para otros, por ejemplo en los suelos preconsolidados su validez se pone en duda.

Otra incertidumbre es debida a las expresiones para el cálculo de asentamientos y capacidad de carga. En ellas se introducen numerosos coeficientes, que a pesar de estar basados en las observaciones de muchas obras de ingeniería, son de validez dudosa para un suelo determinado.

En algunos problemas se puede emplear con más seguridad el método presiométrico, por ejemplo para el cálculo de empuje de tierras sobre muros de retención. Las cargas que se aplican al muro son en este caso horizontales y se asemejan a las transmitidas por la sonda presiométrica. Como ejemplo adicional puede mencionarse el caso de cimentaciónes a base de cilindros, utilizando el método del pozo indio, en los que ocurre que los cilindros no bajen en determinado momento. Esto se debe a dos fuerzas que lo detienen, primero la de fricción suelo-cilindro y segundo las fuerzas horizontales sobre el fuste del cilindro y pueden calcularse por medios presiométri-

cos, mediante pruebas de descarga.

También se puede mencionar el caso de cimentaciones sujetas a fuerzas horizontales como los duques de alba, o las cimentaciones piloteadas sujetas a fuerzas sísmicas, es decir, problemas donde hay una reacción horizontal del terreno.

Se mencionó en capítulos anteriores otro inconveniente de los ensayes presiométricos y es la discontinuidad de información de las características esfuerzo - deformación del suelo a lo largo de la perforación, lo cual puede producir que estratos importantes no sean detectados y terminen con el buen diseño de una obra de ingeniería.

Se recomienda que los resultados presiométricos vayan siempre acompañados de otros estudios basados en análisis teóricos o en pruebas de campo de otro tipo con el fin de rectificar o ratificar aquellos resultados obtenidos y tomar una decisión más acertada en el diseño de obras de ingeniería.

R E F E R E N C I A S

1.- Pressure-meter field testing of soils
Max L. Calhoon
Civil Engineering, ASCE Julio 1969, pp.71 a 74

2.- Mécanique des Sols
Sanglerat y Costet
pp. 551 a 559

3.- Interpretation d'un essai pressiometrique
Centro de Estudios Geotécnicos de Paris
Serie "Documentación técnica" D/31/67

4.- Expansion of Cavities in an Infinite Soil Mass
Alexander Sedmak Vésic
Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE
Vol. 98, No SM3 Marzo 1972, pp. 265 a 290

5.- Expansion of cylindrical Probes in cohesive soils
Francoise Baguelin, Jean-Francois Jezequel, Eugene Le Mee, Alain Le Mehaute
Journal of the Soil Mechanics and Foudation Division, ASCE
Vol. 98, No SM11 Nov. 1972, pp. 1129 a 1142

6.- The pressurement method of investigating soil properties and its theoretical basis
Bronstein, Mikheev, Ruppeneit, Lushnikov, Shvets
Proceedings of the eight international Conference of Soils Mechanics and Foundation Engineering, 1973 pp. 79 a 83

7.- A simple interpretation of the pressiometer testing in cohesive soils
Arnold Palmer

8.- Règles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondations
Centro de Estudios Geotécnicos de Paris
Serie "Documentación técnica" D/60/67

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

1.- Resitencia de Materiales
Timoshenko y Goodier

2.- Manual para utilizar el presiómetro tipo G
Fabricante: Techniques Louis Ménard

3.- Les Techniques pressiométriques apliqées a l'etude des sols de fondation
Centro de Estudios Geotécnicos de Paris
Serie "Documentación Técnica" D/70/67