



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA**  
**DE MÉXICO.**

87

**FACULTAD DE INGENIERIA**

EL USO DEL ENSAYE PRESIOMETRICO  
EN EL DISEÑO GEOTÉCNICO DE UNA  
CIMENTACIÓN SUPERFICIAL.

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
P R E S E N T A :  
**O S C A R M E N D O Z A R I V A S**

289792



MÉXICO, D. F.

2000.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/224/99

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE  
MEXICO

Señor  
**MENDOZA RIVAS OSCAR**  
Presente .

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**“USO DEL ENSAYE PRESIOMETRICO EN EL DISEÑO GEOTECNICO DE UNA CIMENTACION SUPERFICIAL”**

**INTRODUCCION**

- I. DESARROLLO HISTORICO DEL ENSAYE PRESIOMETRICO Y GENERALIDADES**
  - II. DESCRIPCION DEL EQUIPO PRESIOMETRICO Y DESARROLLO DE LA PRUEBA**
  - III. INTERPRETACION DE RESULTADOS DEL ENSAYE PRESIOMETRICO**
  - IV. DISEÑO GEOTECNICO DE UNA CIMENTACION SUPERFICIAL**
  - V. CONCLUSIONES**
- REFERENCIAS**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”  
Cd. Universitaria, a 17 de enero del 2000.  
EL DIRECTOR

  
M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB/GMP/nll

**A DIOS : Por haberme permitido llegar a culminar este trabajo.**

**A MIS PADRES: Por su gran cariño e incondicional apoyo para conmigo.**

**A MIS HERMANOS: Para que continuemos estando unidos**

**AL DR. RIGOBERTO : Por su paciencia y apoyo en la realización de este trabajo.**

## INDICE

### USO DEL ENSAYE PRESIOMETRICO EN EL DISEÑO GEOTECNICO DE UNA CIMENTACION SUPERFICIAL.

INTRODUCCION.....	1
-------------------	---

#### CAPITULO I

##### DESARROLLO HISTORICO DEL ENSAYE PRESIOMETRICO Y GENERALIDADES.

I.1.- Desarrollo histórico.....	5
I.2 .- Generalidades.....	6

#### CAPITULO II

##### DESCRIPCION DEL EQUIPO PRESIOMETRICO Y DESARROLLO DE LA PRUEBA.

II.1.- La sonda.....	10
II.2.- La unidad de control.....	16
II.2.1.- Presiómetro con perforación previa.....	19
II.2.2.- Presiómetro auto perforante.....	27
II.2.3.- Presiómetro de empuje.....	28
II.3.- La tubería.....	28
II.4.- Instalación del equipo.....	29
II.5.- Calibración del equipo.....	35
II.6.- Realización del ensaye presiómetrico.....	37
II.7.- Factores que afectan el ensaye presiómetrico.....	49

### **CAPITULO III**

#### **INTERPRETACION DE RESULTADOS DEL ENSAYE PRESIOMETRICO.**

<b>III.1.- Esfuerzo horizontal total.....</b>	<b>66</b>
<b>III.2.- Módulo del esfuerzo cortante.....</b>	<b>72</b>
<b>III.3.- Resistencia al corte no drenada.....</b>	<b>75</b>
<b>III.4.- Angulo de fricción interna.....</b>	<b>79</b>
<b>III.5.- Parámetros Menard.....</b>	<b>80</b>

### **CAPITULO IV**

#### **DISEÑO GEOTECNICO DE UNA CIMENTACION SUPERFICIAL , UTILIZANDO LA PRUEBA MENARD.**

<b>IV.1.- Características del proyecto .....</b>	<b>94</b>
<b>IV.2.- Pruebas de campo.....</b>	<b>97</b>
<b>IV.3.- Curva presiométrica .....</b>	<b>110</b>
<b>IV.4.- Perfil presiométrico.....</b>	<b>125</b>
<b>IV.5.- Capacidad de carga.....</b>	<b>127</b>
<b>IV.6.- Deformaciones.....</b>	<b>131</b>
 <b>CONCLUSIONES.....</b>	 <b>134</b>
 <b>REFERENCIAS.....</b>	 <b>135</b>

**INTRODUCCION.**

La geotecnia dispone actualmente de diferentes modelos de comportamiento para poder caracterizar a los suelos, sin embargo, independientemente del modelo elegido, el problema al que se enfrenta el ingeniero especialista para el análisis de cimentaciones, elementos de retención, taludes, etc. , consiste en poder determinar adecuadamente los parámetros representativos del suelo, de tal manera que el modelo permita estimar razonablemente la respuesta del sistema analizado.

Normalmente, los parámetros mecánicos del suelo son obtenidos en el laboratorio sobre muestras llamadas "inalteradas" , es decir especímenes cuya estructura natural no ha sido modificada en forma significativa durante su extracción del subsuelo.

Sin embargo es bien conocido que, salvo en el caso de los suelos finos cohesivos de consistencia blanda a media, la extracción de muestras inalteradas es difícil y en muchos casos imposible, por lo que es necesario recurrir en estos casos a pruebas de campo (también llamadas pruebas in-situ), para la obtención de parámetros mecánicos que permitan caracterizar al subsuelo.

Aún cuando es posible la recuperación de muestras inalteradas estas son de representación dudosa puesto que se seleccionan los materiales que se prestan mejor al muestreo. Se encuentran además grandes dificultades para el labrado de especímenes y es común tener que recurrir a equipo de laboratorio no convencional . De allí el interés que para este tipo de materiales presentan las pruebas campo.

Las pruebas de campo se pueden clasificar en dos tipos:

- A) Las que miden las propiedades mecánicas del terreno en condiciones de falla.
- B) Las que miden las propiedades mecánicas del terreno, tanto en condiciones de falla como antes de ésta.

En el primer tipo de prueba pueden incluirse por ejemplo la técnica de penetración estándar (SPT), el cono estático (CPT), el cono dinámico y la veleta.

En el segundo tipo de pruebas se encuentran los ensayos de carga . El ensaye presiométrico pertenece también a esta categoría. En efecto su modo de operación permite aprovechar la ejecución de una perforación para ensayar el terreno hasta la condición de falla a diferentes profundidades. Lo anterior es muy importante puesto que confiere una gran eficacia y



economía al ensaye presiométrico, comparada con aquella obtenida en otras pruebas de carga (como la prueba de placa y la de cimentaciones a escala natural, por ejemplo). Además puede realizarse prácticamente en cualquier tipo de material. Se estima en varios millones el número de ensayos presiométricos realizados en Europa. En Francia, el 85 % de todas las estructuras ( edificios ,puentes, estadios, etc.) se diseñan con base en el ensaye presiométrico.

En el continente americano, y en particular en México, a pesar de que se conoce el presiómetro desde hace más de dos décadas, no ha tenido el mismo auge, sin embargo, cada vez se usa con mayor frecuencia , especialmente en materiales difíciles de muestre.

En el presente trabajo presentamos un panorama general del desarrollo del presiómetro desde su inicio, una descripción del equipo presiométrico y desarrollo de la prueba , así como la interpretación de los resultados obtenidos de ésta y su aplicación a un diseño geotecnico de una cimentación superficial real.

## **CAPITULO I**

### **DESARROLLÓ HISTORICO DEL ENSAYE PRESIOMÉTRICO Y GENERALIDADES.**

**I.1.-** Desarrollo histórico.

**I.2 .-** Generalidades.

## L1.- DESARROLLÓ HISTORICO.

A continuación se proporciona una visión sintetizada de lo que ha sido el desarrollo del ensayo presiométrico en el mundo.

En 1933 en Alemania Kogler (Baguelin, 1978), desarrolló el primer Presiómetro con perforación previa, solo que no terminó la idea, fue entonces que Menard, en 1955, en Francia, desarrolla el Presiómetro con perforación previa para medir las propiedades de deformación del suelo in-situ y comenzó su propia compañía. Fukuoka, en 1959, en Japón desarrolló un Presiómetro con perforación previa que permite obtener el valor del módulo lateral del suelo, el mismo año Menard construye un tubo ranurado que protege el interior de la sonda, esta cubierta ranurada es insertada una vez que la sonda ya esta colocada en el subsuelo. En 1963, Menard, con la experiencia obtenida, publica un primer procedimiento y los y gráficos relacionados con los resultados del ensayo presiométrico, para diseño de cimentaciones y capacidad de carga. En un esfuerzo por mejorar el procedimiento, Jezequel, en 1965, in Francia, desarrolla el primer Presiómetro de auto perforación en el laboratorio "de Ponts et Chaussees.". En 1966, Suyama, en la corporación OYO desarrolló la prueba para cargas laterales y después el Elastometro 100, ambos son presiómetros de perforación previa(prebored). Wroth y Hughes, en 1971 en Inglaterra desarrollan del presiómetro de auto perforación llamado el Camkometro. En 1975 la fundación de investigaciones de construcciones en el reino Unido construyo el Presiómetro de empuje (push-in Pressuremeter) para aplicaciones en la costa, En 1978, Briaud y Shield en Canadá desarrollaron un pequeño Presiómetro para el diseño de pavimentos que es conocido como Pencil. En el mismo año el instituto de investigaciones de la Union Soviética de cimentaciones desarrolló un presiómetro automático llamado PA108. Mientras que el Instituto del Petróleo Francés desarrolló el Presiómetro de auto perforación para costas llamado el PAM. En 1981, Hergheleglu y Unchesel reportaron un presiómetro prototipo manufacturado en Rumania. EN 1982, Briud desarrolló el TEXAM, presiómetros de perforación previa y de auto perforación para pruebas en roca. En 1982 el laboratorio des Ponts et Chaussees en conjunto con las técnicas de Louis Menard desarrollaron el LPC-TLM presio-penetrómetro para penetraciones superficiales cerca de la costa. El primer simposium sobre el presiómetro y sus aplicaciones a la marina se

realizo en Francia en 1982. De 1982 a 1986 varios grupos de investigadores como la universidad de TEXAS , la universidad de British Columbia, instituto Cambridge , etc. desarrollan el cono presiométrico. En 1984 Bonne Esperance en Francia introducen el PAC<sup>3</sup>, una versión automática del presiómetro de Menard asistido por computadora, el mismo año Roctest y Cambridge Insitu ambos desarrollaron el Presiómetro de alta presión para prueba en roca. En 1986 se realizo el segundo simposium sobre el presiómetro y sus aplicaciones en trabajos fuera de la costa en la Universidad de Texas. En los últimos años se ha incrementado en forma significativa el uso del presiómetro en países como Francia, Inglaterra, Japón, Canadá, y más recientemente en Italia , Noruega y los Estados Unidos.

## **I.2.- GENERALIDADES.**

Se tienen diferentes formas o procedimientos de instalación del equipo presiométrico como son el de perforación previa (Prebored), el de auto perforación (Selfboring), el de empuje (Push-in), entre otros , el procedimiento que comúnmente se utiliza es el de perforación previa (Prebored), su alcance en suelos es ilimitado, en contraste con su uso en mecánica de rocas.

La prueba del Presiómetro consiste fundamentalmente en introducir una sonda cilíndrica en el suelo y aplicar una presión a la misma para que el suelo se expanda horizontalmente. Su interpretación esta basada en la teoría de expansión y contracción de una cavidad cilíndrica, ya sea con un drenado continuo o sin drenar, el esfuerzo al iniciar la prueba es igual al esfuerzo horizontal in situ. En una prueba ideal es posible obtener directamente los esfuerzos horizontales , módulo al cortante y ángulo de fricción interna, dependiendo de que la prueba sea drenada o sin drenar. El esfuerzo horizontal puede ser determinado directamente del Presiómetro self-boring ( SBP ), del Presiómetro prebored (PBP) y de la prueba con el Presiómetro push-in ( FDP ). La pendiente inicial de la curva del ensaye presiométrico se atribuye a la perturbación del suelo durante su instalación. La presión  $p_r$  (esfuerzo radial,  $p_r$  a la pared de la cavidad) y los incrementos relativos en el radio de la cavidad (esfuerzo

tangencial) son obtenidos de la curva esfuerzo - deformación que se obtiene de la prueba del Presiómetro in-situ. La prueba se realiza a varias profundidades con el propósito de obtener el perfil de los parámetros presiométricos del suelo.

Se han desarrollado tres métodos de interpretación del ensaye presiométrico (Menard , 1957)

Método A: es una interpretación empírica que da parámetros de diseño directamente. Este método fue desarrollado por Menard y el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, está basado en correlaciones entre observaciones de estructuras a escala natural y curvas de ensayes presiométricos. Los parámetros derivados de la curva son función de la instalación de la sonda y del procedimiento de ejecución del ensaye presiométrico, los cuales son utilizados en modelos de comportamiento desarrollados para el ensaye presiométrico.

Método B: mediante la integración de una curva esfuerzo - deformación al cortante se obtiene la curva presiométrica. Este método permite que la fuerza y rigidez del suelo sea cuantificado con base en un modelo elasto - plástico. Se han propuesto un sin número de técnicas que toman en cuenta los efectos de instalación , pero su uso es muy reducido en la práctica. En general se aceptan métodos simples que permitan obtener parámetros adecuados para el diseño, y para la interpretación de la parte seleccionada de la curva del ensaye presiométrico.

Método c: obtiene una curva de respuesta del suelo de la diferencia de los datos del ensaye presiométrico y de la curva esfuerzo deformación al cortante. Este método permite que la curva represente la verdadera respuesta del suelo, ya que en la práctica el estado del suelo in-situ es diferente por los efectos de instalación.

Las aplicaciones de la prueba con perforación previa (prebored) al diseño geotécnico incluye cimentaciones superficiales bajo cargas verticales, cimentaciones profundas bajo cargas verticales y horizontales, pavimentos, control de la compactación y mejoramiento de suelos. Los resultados de la prueba son poco utilizados en el análisis de estabilidad de taludes.

En general la interpretación del ensaye presiométrico está basado en teorías modificadas por la experiencia que toman en cuenta los efectos de instalación y las condiciones del suelo. Los resultados obtenidos son función del método a seguir, los métodos de diseño dependen a su

vez de los métodos de interpretación, pero el número de métodos utilizados en la práctica que permitan obtener resultados consistentes es todavía limitado.

Los resultados obtenidos del ensaye presiométrico han sido utilizados en el diseño geotecnico por más de 30 años. Este método incluye procedimientos de calculo para obtener parámetros de resistencia para diseñar cimentaciones superficiales y profundas, para analizar pilas cargadas horizontalmente y la estabilidad de taludes. La curva del ensaye presiométrico puede ser interpretada utilizando un marco de referencia coherente que reproduzca realmente los valores in situ del estado de esfuerzos y las condiciones de rigidez del suelo.

El ensaye presiométrico es el mas versátil de cualquier equipo de prueba, logrando realizarlo en casi todo tipo de suelo, obteniéndose una curva de respuesta del suelo directamente en el sitio de prueba. Dicho ensaye muy eficiente, económico , y más rápido que cualquier otro método de muestreo, podría decirse que el costo es dos veces menor a cualquier otra alternativa y se obtienen los mismos resultados.

## CAPITULO 11

### DESCRIPCION DEL EQUIPO PRESIOMÉTRICO Y DESARROLLO DE LA PRUEBA.

- II.1.- La sonda.
- II.2.- La unidad de control.
  - II.2.1.- Presiómetro con perforación previa.
  - II.2.2.- Presiómetro auto perforante.
  - II.2.3.- Presiómetro de empuje.
- II.3.- La tubería.
- II.4.- Instalación del equipo.
- II.5.- Calibración del equipo.
- II.6.- Realización del ensaye presiométrico.
- II.7.- Factores que afectan el ensaye presiométrico.

## **DESCRIPCION DEL EQUIPO Y DESARROLLO DE LA PRUEBA.**

El principio fundamental del ensaye del presiómetro es la expansión de una cavidad cilíndrica formada en el suelo con el objeto de poder medir la relación entre la presión aplicada y la deformación provocada en el suelo. En la práctica se hace una perforación hasta la profundidad donde se realizará la prueba, después se inserta la sonda del presiómetro y se infla para expandir la cavidad. Se lleva un registro de los resultados de la presión aplicada y del cambio de volumen; el incremento en el volumen es debido sólo a la expansión radial de la perforación, ya que las celdas de guardia evitan que la celda central se expanda en forma vertical.

### **EL PRESIÓMETRO.**

El presiómetro consiste fundamentalmente de tres partes como se muestra en la figura 2.1 las cuales son: la sonda, la tubería y la unidad de control.

#### **II.1.- LA SONDA**

La sonda presiométrica es un elemento cilíndrico donde se puede aplicar una presión uniforme a través de una membrana flexible hacia las paredes de la perforación, realizada especialmente para el ensaye presiométrico. En todos los ensayes presiométricos la presión aplicada se incrementa y se registran los desplazamientos de la membrana, éstos dan la respuesta del terreno con el cambio de presión. Al ser dibujada la presión aplicada contra los desplazamientos se obtiene lo que se conoce comúnmente como la curva presiométrica o curva de respuesta del terreno. El ensaye presiométrico es una prueba de campo que puede dar directamente valores in situ del esfuerzo horizontal, la rigidez y la resistencia.

Las sondas de los presiómetros se agrupan de acuerdo con el método de instalación(perforación previa, auto perforación, empuje) y de medición de los desplazamientos provocados, pudiéndose obtener éstos a partir de los cambios de volumen de la sonda o midiendo directamente sus deformaciones radiales. En la tabla 2.1 se dan



detalles comerciales de los presiómetros Ingleses señalando el grupo al que pertenecen ,método de medición de los desplazamientos y los tipos de suelos en los que pueden operarse. La instalación del presiómetro puede alterar las condiciones del suelo durante la prueba, la respuesta medida en el suelo puede diferir de acuerdo al sistema de medición utilizado, la información obtenida del ensaye depende en parte del tipo de instalación seleccionada.

Las sondas son muy similares en apariencia pero cuando se observan con cierto detalle pueden diferir significativamente.

El diámetro desinflado puede variar entre 40 y 80 mm y el largo puede variar entre uno a dos metros, la proporción largo a diámetro de la sección expandida excede de cinco. Las dimensiones de la sonda están regidas por el diámetro y la longitud de la perforación.

La membrana expandida usualmente elaborada de hule esta protegida por unas bandas de acero, las cuales evitan que se dañe la sonda durante la instalación y operación. La membrana se infla con aceite o aire a presión desde la superficie.

<i>GRUPO</i>	<i>NOMBRE</i>	<i>CAPACIDAD DE PRESIÓN MPa</i>	<i>CAPACIDAD ESFUERZO %</i>	<i>DIAMETRO mm</i>	<i>LARGO TOTAL m</i>	<i>LARGO EXPANDIDO mm</i>	<i>L/D</i>	<i>SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO MEDIDO</i>	<i>CONDICIONES DEL SUELO</i>
PREBORED	Presiómetro Menard GC	4	53	74	--	--	6.5	VOLUMEN	todos los suelos
	Presiómetro Menard GB	20	53	74	--	--	6.5	VOLUMEN	roca frágil a moderadamente dura
	Oyo Elastometro 100	10	12	66	--	520	7.4	UN DIAMETRO	arcilla dura, arena densa y roca frágil
	Oyo Elastometro 200	20	--	66	--	520	7.4	UN DIAMETRO	roca frágil a moderadamente dura
	Dilatometro de alta presión	de 20	25	73	1.5	455	6.1	TRES DIAMETROS	roca frágil a moderadamente dura
SELFBORED	Presiómetro Selfboring Cambrige	4-5	15	84	1	500	6	TRES RADIOS	todos los suelos que contengan poca grava o sin ella
	Presiómetro Selfboring para roca fragil	20	10	73	1	400	5.5	TRES RADIOS	arcillas muy duras, arenas muy densas y roca frágil
PUSHED-IN	Cono Presiométrico	4.5	50	44	1	450	10	TRES RADIOS	todos los suelos responden a la prueba del penetrometro de cono estático

Tabla 2.1.- Métodos de instalación , tipo de sondas y métodos de medición de desplazamientos

La sonda fue diseñada para ensayos en suelos o roca, pero en algunos casos una misma sonda puede ser utilizada en diferentes condiciones del subsuelo cuando la sensibilidad del transductor de presiones permita alcanzar la presión máxima requerida. Una presión máxima de 20 MPa es apropiada para pruebas en roca blanda, pero la presión máxima requerida para muchos suelos es menor de 4 MPa. La deformación de la membrana es registrada utilizando transductores de desplazamientos radiales o midiendo el cambio de volumen.

La sonda consiste fundamentalmente de tres celdas; una celda de medición o central y otras dos de guardia. El agua que se utiliza en la sonda se inyecta a presión y se registran las lecturas del cambio de volumen. Las celdas de guardia aseguran que la cavidad se expanda solo en sentido radial, por estar ubicadas en la parte superior e inferior de la celda central o de medición, ellas se inflan usualmente con gas y a la misma presión que la celda central o de medición. Las celdas de guardia se sellan perfectamente asegurando que la celda central se expanda solo en la perforación vacía.

La membrana de plástico es lo suficientemente flexible para asegurar que la presión sea uniforme en toda la pared de la perforación.

Desde 1955 en que se patentó el primer Presiómetro en el Centro de Estudios Menard, se han elaborado varias series de aparatos con diferente concepción de la sonda.

Los diámetros de las sondas están basados en un estándar dado por **EL DIAMOND CORE DRILL MANUFACTURES ASSOCIATION(DCDMA)** como se muestra en la tabla 2.2

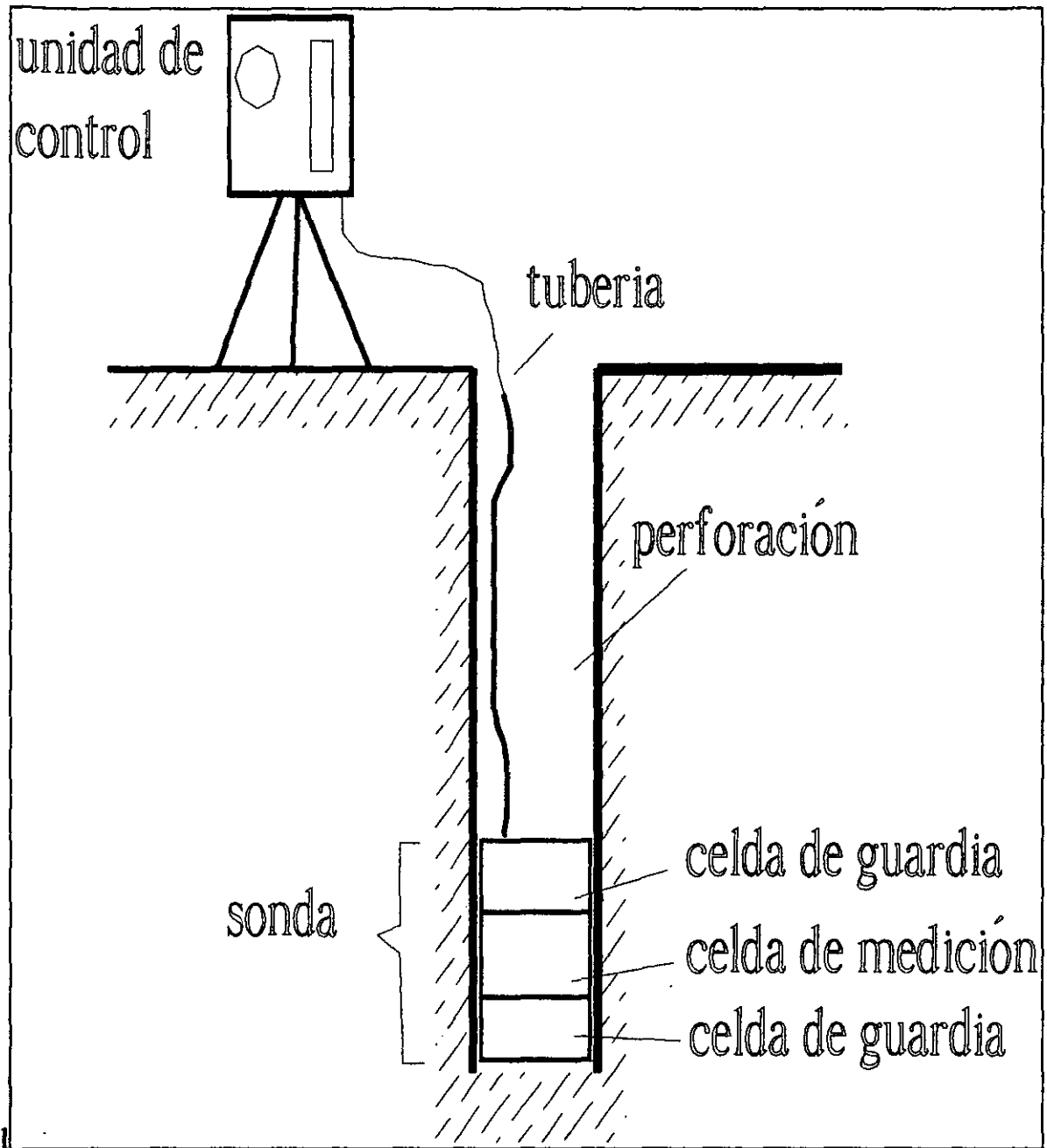


Fig. 2.1 .- Elementos básicos del presiomómetro

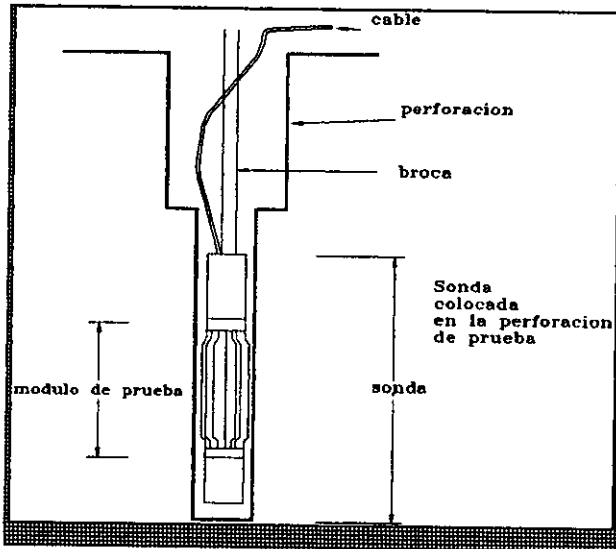


Fig. 2.2 .- La sonda

Código DCDMA	Diámetro de la Perforación		diámetro de la Sonda	Volumen en la Celda de Medición		
	mm			Vo,cm <sup>3</sup>	lo,cm	l,cm
	min.	max.				
AX	46	52	44	535	36	66
BX	60	66	58	535	21	42

Vo, volumen inicial; lo, largo de la celda de medición; l, largo activo de la sonda

Tabla 1.2. Sondas estándar

La sonda Bx es la más utilizada y es llamada la sonda de referencia, el largo de la celda de medición ( lo), es aproximadamente la mitad del largo activo de la sonda, (BAGUELIN, 1978).

El Centro de Estudios Menard manufactura sondas con otros diámetros para el problema que se tenga en particular

## **II.2.- LA UNIDAD DE CONTROL**

La unidad de control, también llamada controlador presión - volumen, contiene todos los elementos necesarios para regular y medir la presión del agua y aire durante el ensaye, así como la correspondiente variación del volumen dentro del sistema tubería - sonda.

La unidad de control se coloca en la superficie, una vez cerrada la perforación, la expansión de la sonda se controla por el monitor, donde es aplicada la presión a la sonda, y se lleva un registro del cambio de volumen de la celda central; la fuente de presión es una botella de gas comprimido, el flujo de agua se controla utilizando un cilindro llamado volúmetro.

Las válvulas y accesorios que contiene la unidad de control permiten elevar o disminuir la presión durante la prueba.

## **II.3.- LA TUBERÍA .**

La tubería es la que une los dispositivos de la sonda a la unidad de control y permite transportar el agua y el gas a la presión deseada desde la unidad de control a la sonda y viceversa.

### **Los resultados típicos de la prueba Menard**

Los resultados típicos de la prueba Menard es la curva que se muestra en la figura 1.3, en las abscisas se tienen los incrementos de volumen dados por el volúmetro, en las ordenadas se tienen los incrementos de presión aplicados. En la curva de la figura 1.3 cada línea vertical representa el incremento de presión y cada línea horizontal es el cambio de volumen ocurrido en el intervalo de un minuto, la curva natural está basada sobre las lecturas tomadas en la unidad de control, las cuales deben ser corregidas para conocer la respuesta presión -volumen del suelo.

#### **a) Correcciones de presión.**

La presión actual aplicada a la sonda es mayor que la lectura registrada en la unidad de control debido a la presión hidrostática del agua en la tubería, por otra parte la presión aplicada al suelo es menor que la presión en la sonda debido a la resistencia propia de la membrana de plástico colocada en la sonda.

#### **b) Correcciones de volumen.**

La compresión del agua en el circuito y la expansión de la tubería se debe tomar en cuenta para corregir las lecturas realizadas en el volúmetro.

En la curva corregida  $v$ - $p$  de la fig. 1.4 construida con las lecturas tomadas al final de cada incremento de presión, se distinguen tres tramos notables en esta curva:

1).- La parte inicial OA de la curva ocurre cuando la sonda se expande hasta tocar las paredes de la perforación y antes que el suelo empiece a ceder; en el punto A se dice que las condiciones iniciales del suelo se restablecen.

2).- El tramo AB se conoce como la fase pseudo elástica de la prueba. El punto A es considerado como el comienzo de la prueba en varias teorías, y el Módulo Menard de deformación del suelo,  $E_m$ , (llamado Módulo Presiométrico de MENARD), se calcula de la pendiente del tramo AB, las coordenadas del punto B ( $P_f, V_f$ ), donde  $P_f$  es considerado como la presión de fluencia.

3).- La porción de la curva llamada fase plástica comienza en el punto B y toma una forma asintótica en dirección horizontal, la presión límite  $P_l$  se define como la presión que se requiere para que se tenga el doble de volumen de la cavidad inicial esto ocurre cuando el volumen  $V_l - V_o = V_e + V_o$ , esto es  $V_l = V_e + 2V_o$

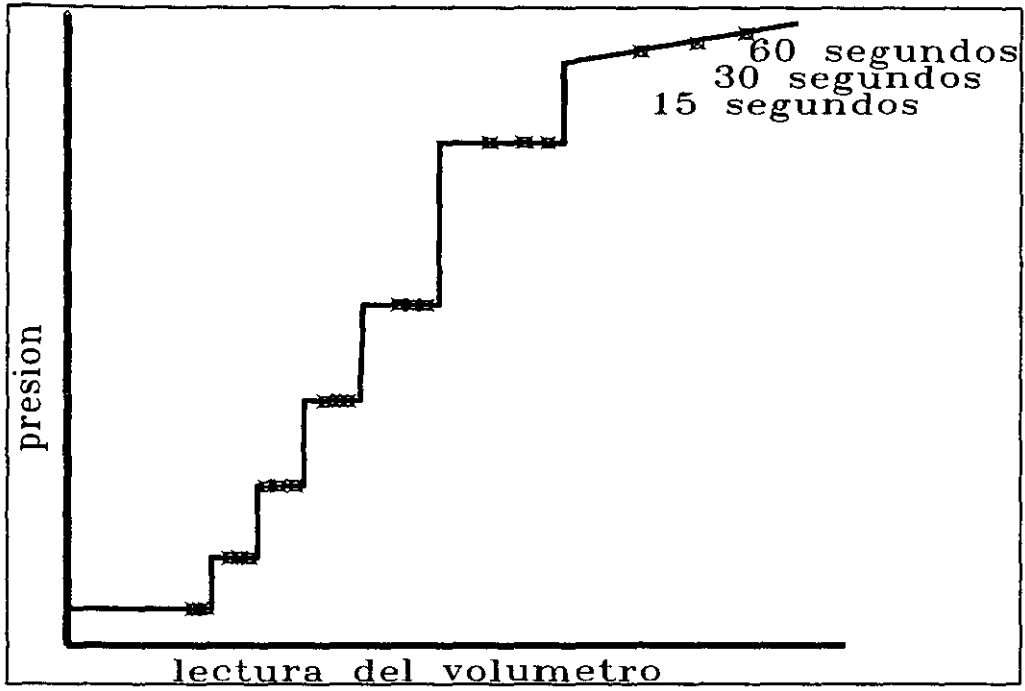


Figura 2.3.-Datos incorrectos del ensaye presiométrico

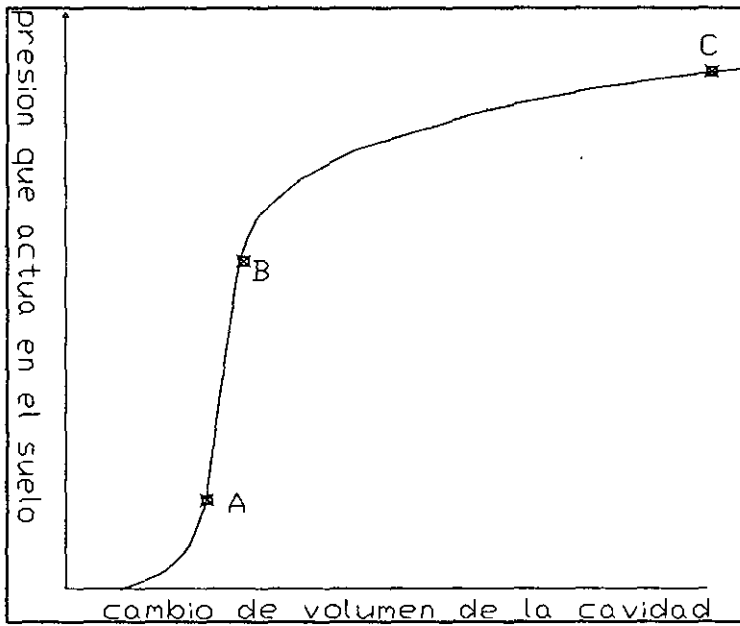


Figura 2.4 datos correctos del ensaye presiométrico.



### **11.2.1 PRESIÓMETRO CON PERFORACIÓN PREVIA (PREBORED (PBP))**

El presiómetro se introduce en la perforación realizada con una broca específica para el tipo de prueba, el diámetro de la perforación es grande en comparación con el diámetro de la sonda.

Este presiómetro puede ser utilizado en cualquier tipo de suelo siempre y cuando las condiciones de la pared de la perforación sean estables. Los presiómetros de perforación previa son los más utilizados en geotecnia y existen diferentes versiones desde 1958. En países como en Japón y Francia su uso se ha extendido a todo tipo de terreno.

El presiómetro Menard (Menard, 1957) pertenece al grupo de los que desplazan volumen y contiene tres secciones expansibles (la sonda de tres celdas se muestra en la figura 2.1. La sección central de la sonda es la que se monitorea y las celdas de guardia al ser infladas aseguran que el largo de la sección de prueba sea constante; este tipo de sonda se utiliza en dos formas, una para suelos y otra para roca, como se puede observar en la tabla 2.1.

El Elastómetro (Suyama k., 1966) y el Dilatómetro de alta presión (Huges J. M., 1980), ambos con sonda de desplazamiento radial son utilizados para pruebas en roca. Ambas sondas son monocelda como se puede observar en la fig. 2.2. La forma clásica de la curva obtenida del ensaye presiométrico con perforación previa es consecuencia de las condiciones de la prueba. La parte inicial de la curva representa la presión requerida para inflar la membrana y vencer la resistencia del lodo de perforación. El movimiento inicial del suelo es función del grado de alteración provocada por la perforación y la instalación de la sonda. La segunda parte de la curva representa la respuesta del suelo inalterado.

Entre los presiómetros con perforación previa se encuentran varios tipos que representan las distintas generaciones de aparatos:

### a) El presiómetro E

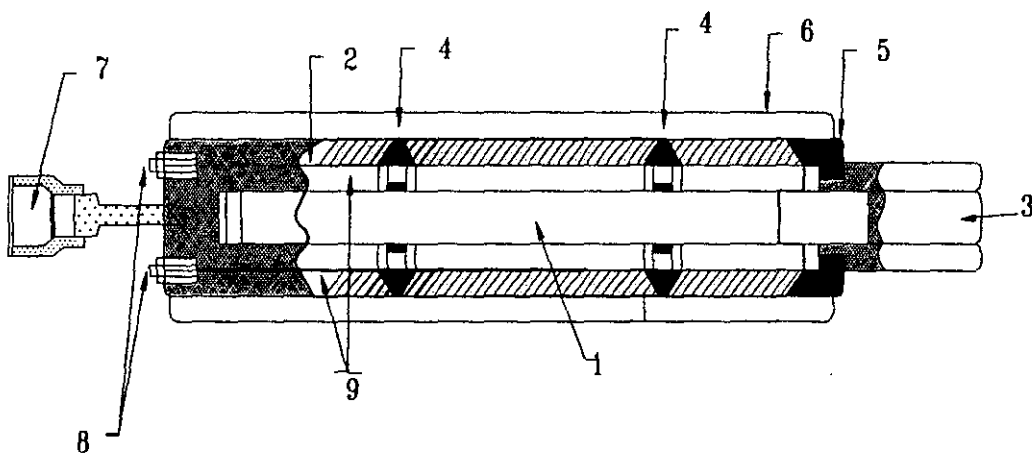
Es el primer presiómetro operacional, data de 1958, este tipo de equipo no fue fabricado de manera exclusiva, ha sido utilizado por pocas instituciones entre ellas el laboratorio de puentes y caminos de Francia.

Al presiómetro E se le puede aplicar una presión alta entre 2000 kPa y 2500 kPa (300 a 370 psi) y se emplea una presión de agua en la unidad de control cuyo volumen es de 750 cm<sup>3</sup>. La sonda tiene tres celdas independientes; se emplea gas para inflar las celdas de guardia.

#### a.1) La sonda (FIG. 2.5)

El cilindro central (1) está rodeado de tres tubos largos de acero (2), cada tubo está envuelto en su propia membrana de hule. Las celdas se mantienen rígidas y son hechas a prueba de goteo por el cono apropiado (llamado bocino) (4) antes de ensamblado se mantiene fijo por una tuerca (5).

Al adquirir la sonda es necesario estar seguro que la membrana esté uniforme en toda su extensión, los conos son oprimidos con firmeza por el corte oblicuo al final de los tubos. Las tres celdas están cubiertas por un tubo largo de hule. La cabeza tiene una conexión hembra (7) fijada al cuerpo central de la sonda.



seccion de la sonda E

FIG. 2.5 Sonda del presiómetro E.

### **a.2) La unidad de control.**

Es esencialmente un depósito metálico cilíndrico(1) , en el cuál la sección transversal es de cerca de  $10 \text{ cm}^2$  y un largo de aproximadamente un metro. El depósito debe colocarse verticalmente sobre la superficie del soporte removible(2) , debe llevar todas las válvulas requeridas y accesorios, incluyendo los manómetros de presión y la botella de gas comprimido.

El volumen de agua medido es enviado por el volúmetro(3), éste es simplemente un tubo de plástico transparente graduado que está colocado en forma paralela al depósito. Cada graduación representa  $10 \text{ cm}^3$  y se pueden hacer aproximaciones al  $\text{cm}^3$  , la válvula (4) en la base del depósito sirve de purga, los cambio de volumen de cerca de  $0.01 \text{ cm}^3$  no pueden ser estimados correctamente.

### **a.3) Los circuitos.**

La sonda y la unidad de control están unidas por tres largos tubos de plástico pero completamente separados uno de otro, o sea no son coaxiales, el plástico es semi - rígido y es transparente, lo cual permite que el agua circule fácilmente. La presión del agua en la sonda y la presión del gas en el depósito es regulada por la válvula(5), el manómetro indica la presión existente en la botella de gas, los niveles del agua en el depósito son controlados por la válvula (7), pasando el líquido por la tubería (8) de la abertura 1 sobre la cabeza de la sonda, el agua circula hacia abajo facilitan el aereamiento y va directo a la cubierta de la unidad de control (10). En el manómetro de presión M3 es donde se toman las lecturas durante la prueba del presiómetro. El gas es inyectado en las dos celdas de guardia simultáneamente a través de la tercer tubería (12), la presión es controlada por el regulador de presión (13) y monitoreado por el manómetro M2.

## **b) PRESIÓMETRO GC**

Normalmente el presiómetro GC puede alcanzar una presión de 2500 kPa (370 psi), pero mediante pequeñas modificaciones puede alcanzar una presión por arriba de los 4000 kPa (600 psi). La capacidad del depósito en la unidad de control es de 900 cm<sup>3</sup>, la sonda del presiómetro E es diferente a la sonda del presiómetro GC, además la celda central o de medición está separada

### **b.2) La unidad de control**

La unidad de control es montada en un tripie, la cubierta frontal protege los manómetros y el volúmetro durante el transporte. La cubierta posterior permite el acceso a la tubería y su llenado si se requiere. Las partes esenciales de la unidad de control son :

- 1) El volúmetro
- 2).- Escala graduada
- 3) .-Tubería de plástico limpia sin graduar, la cuál es utilizada por el volúmetro cuando se conecta en paralelo con el depósito.

La escala está graduada para cada 5 cm<sup>3</sup> de agua en el depósito y se pueden realizar lecturas muy cercanas al cm<sup>3</sup>, el cero forma parte de la escala. La unidad de control mantiene solo 800 cm<sup>3</sup> de agua. La parte negativa de la escala evita que el depósito se pueda sobre llenar. Una característica del presiómetro GC es que no tiene forma de aislar el volúmetro del depósito.

Los manómetros de presión: La presión del agua es medida por dos manómetros que tienen rangos de 0 a 500 kPa (0-75 psi) y de 0 a 2500 kPa (0- 370 psi). El manómetro de bajo rango es protegido contra el daño que pudiera sufrir por un cierre rápido de la válvula cuando su capacidad es alcanzada. Un elemento muy importante en el presiómetro GC es el manómetro que mide las diferencias de presión entre las celdas de guardia y la celda central o de medición. El presiómetro GC no tiene manómetro para medir la presión en el circuito de gas.

## **b.2) Los circuitos**

La sonda y la unidad de control están unidos por una tubería coaxial de polyamide semirígida. El agua sólo debe llegar a la celda de medición y el gas sólo a las celdas de guardia.

La columna de agua en el depósito empuja en dirección de la sonda debido a la presión de gas que es controlada a su vez por la válvula de regulación, la cuál esta conectada al suministro de gas, la presión en la botella de gas es indicada por un manómetro, además indica la presión que esta actuando en el circuito de la celda de medición cuando el depósito está cerrado.

La diferencia de presión entre la celda central o de medición y la celdas de guardia está controlada por una válvula y su magnitud se mide en el manómetro.

## **PRESIÓMETRO GB**

El presiómetro GB generalmente cuenta con todos los dispositivos necesarios para su operación, además puede alcanzar una presión de 10,000 kPa (1500 psi). Las tres celdas en la sonda son distintas, cada una cuenta con una unidad autónoma. La celda central o de medición es provista de agua de un depósito y las celdas de guardia son alimentadas de otro depósito, ambos de una capacidad de 800 cm<sup>3</sup>.

### **La unidad de control**

La unidad de control es una caja montada sobre un tripie removible, la carátula frontal protege las válvulas y manómetros durante su transporte y la cubierta posterior da acceso a la tubería y trabajos interiores

Las partes esenciales son:

Las carátulas de vidrio donde se indica el nivel del agua en los dos depósitos que están conectados a las celdas de medición y de guardia, respectivamente;, solo una carátula esta provista de una escala graduada donde se pueden tomar lecturas cercanas al cm<sup>3</sup>. Se toman solo las lecturas positivas, las negativas indican lecturas fuera de rango.

La presión debe mantenerse en el suministro de gas, la cual es medida por un manómetro, el rango en el manómetro de presión es 0 a 20,000 kPa (0 a 3,000 psi).

Finalmente dispone de un número de válvulas, de las cuales (11) permite que el depósito se aisle del resto del sistema, con lo que se logra que las lecturas tomadas tengan una precisión de cerca de 0.02 cm

### **EL PRESIÓMETRO ASISTIDO POR COMPUTADORA (PAC)**

La unidad de control (fig.2.6)

El sistema esencial consiste de dos circuitos: el circuito de agua, el cuál es utilizado para medir el volumen de agua que es inyectada en la celda de agua, y el circuito de gas empleado para expandir la celda de gas, esta presión siempre es menor que en la celda de agua.

El volúmetro. El volumen de agua inyectado en la celda de agua es monitoreado utilizando un tubo graduado dentro del volúmetro (lecturas cercanas al  $\text{cm}^3$ ).

Las lecturas de presión. La presión en el circuito de gas es registrada al final de cada incremento de presión.

El procedimiento de prueba. Después de haber realizado todas las revisiones y llevado a una lectura de cero, incluyendo los ajustes apropiados de la diferencia de presión para la profundidad de prueba, el operador incrementa la presión utilizando un regulador y se registran las lecturas de los incrementos de volumen y del volumen inyectado.

La unidad de control es soportada sobre una tripie removible, es una unidad electrónica que trabaja con una batería de 12 V y un suministro de gas portátil.

Cuatro conectores jaeger transmiten señales electrónicas a través de pulsos, los cuales se convierten a variables físicas para su interpretación. las dos unidades se pueden separar fácilmente.

**Panel frontal (fig. 2.6)**

- 1.- Puerto para suministro de gas
- 2.- Puerto para celda de gas
- 3.- Puerto para celda de agua.
- 4.- Válvula de suministro de agua.
- 5.- Puerto para el manómetro de presión del agua.
- 6.- Puerto para el manómetro de presión de gas
- 7.- Tapa para llenar el depósito.
- 8.- Válvula de llenado/vaciado del volúmetro.
- 9.- Botón par ventilar al volúmetro a la atmósfera.

La unidad de procesamiento central es un microprocesador NSC 800 el cual maneja el sistema, transfiere los datos de control entre la unidad y periféricos y establece un dialogo con el operador, también calcula los parámetros presiométricos como son el módulo presiométrico y la presión límite.

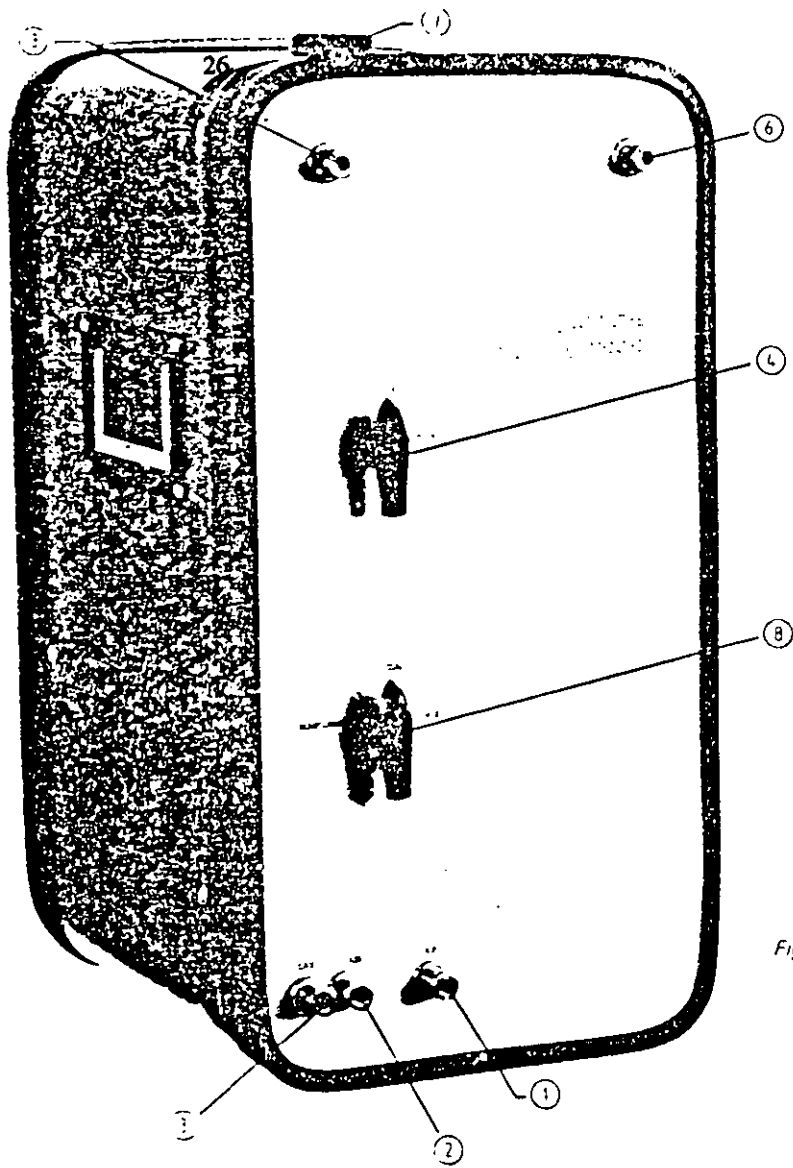


Figure 6

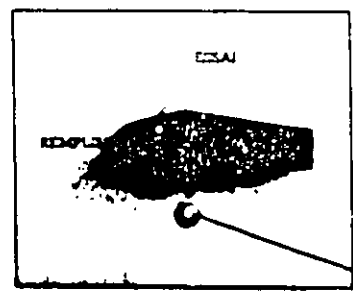


Figure 7

Fig. 2.6 Presiómetro asistido por computadora (PAC).



### 1L2.2 PRESIÓMETROS AUTO PERFORANTE(SELF-BORING (SBP)).

El primero de estos presiómetros fue desarrollado en los años 70s. Se introducen en el suelo por auto perforación, de esta forma el equipo reemplaza al volumen del suelo perforado por lo que teóricamente los esfuerzos in situ no cambian y la curva obtenida del ensaye presiométrico representa la verdadera respuesta del suelo. En la práctica se tienen los mismos problemas de remoldeo del suelo que con los otros métodos de instalación, pero en menor magnitud por lo que para su interpretación se asume que la sonda fue colocada correctamente. Este tipo de sonda puede ser utilizada en suelos con contenidos de grava pequeño y en rocas de consistencia blanda.

El presiómetro Cambridge auto-perforante(CSBP) (Wroth, 1973) y el presiómetro auto-perforante para roca de consistencia blanda (RSBP) (Clarke B. 1989), ambos de desplazamientos radiales son de sonda tipo monocelda (fig. 1.7). El barrenado en el lugar se realiza usualmente con un equipo de rotación. La membrana puede ser protegida por una cinta metálica para pruebas en arenas, arcillas duras y arcillas que contengan grava.

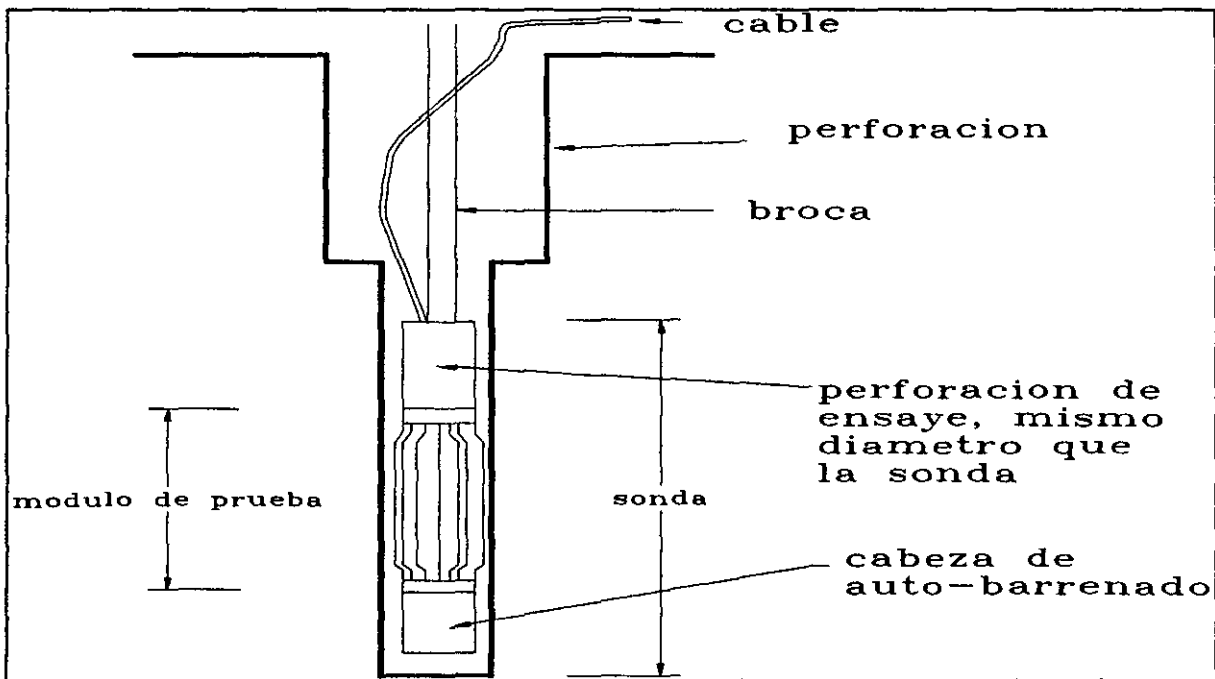


Fig. 2.7. PRESIÓMETRO AUTO-PERFORANTE(SBP)

### IL2.3 PRESIÓMETROS DE EMPUJE (PUSHED-IN (FDP))

Estos presiómetros fueron también desarrollados en los años 70s con el objeto de poder reducir el número de operaciones a realizar en los ensayos presiométricos, incrementando su velocidad de instalación, pueden ser utilizados sólo en suelos donde sea posible hincar el cono estático. Los desplazamientos en el suelo son constantes al desinflar el diámetro de la sonda y el remoldeo creado durante la instalación es siempre la misma en suelos similares.

Los desplazamientos totales del cono presiométrico (Withers, 1986) son desplazamientos tipo radial de una sonda monocelda (FIG.2.8). La membrana se infla con aire o aceite a presión. La membrana se protege con una cinta metálica para evitar daños en la sonda.

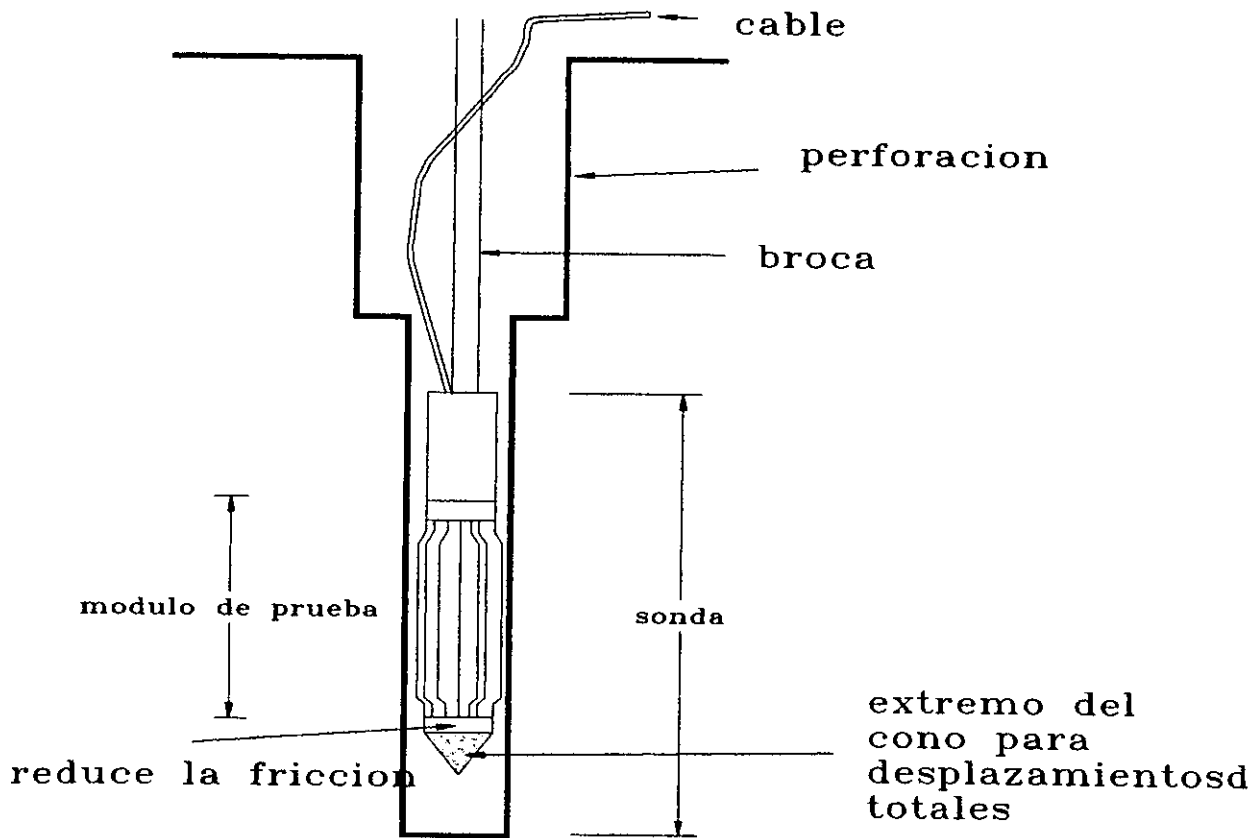


FIG. 2.8 PRESIÓMETRO DE EMPUJE (FDP)

## II.4 INSTALACIÓN DEL EQUIPO.

Los operadores deben seleccionar correctamente los siguientes elementos:

1.- El largo de la tubería. La tubería debe tener un largo suficiente para alcanzar la máxima profundidad  $Z$  del ensaye presiométrico, usualmente el largo es igual a  $Z + 5m$  ( $Z+15$  pies) , es necesario evitar un largo excesivo, en particular con el Presiómetro E . Una tubería larga plantea problemas de saturación de las líneas y grandes volúmenes de corrección en la expansión de la tubería bajo presión, se tiene como regla dos largos estándar, 20 y 30 mts (60 y 100 pies).

2.- La sensibilidad de la medición de las presiones.- El manómetro debe adaptarse a un rango de presiones uniformes.

3.- La membrana y cubierta.- La selección de la membrana de plástico y la protección de la carátula es función del rango de presiones que se alcanzarán, la sensibilidad de las membrana se reduce si aumenta su rigidez.

4.- La carga de gas.- El tipo de gas más adaptable a un ensaye en particular es el aire comprimido , el dióxido de carbón puede utilizarse en pruebas donde se pueda alcanzar un nivel de presión cercano a los 2,000 kPa (300psi), el nitrógeno puede utilizarse cuando las presiones son muy elevadas.

El operador debe revisar todos los diversos aditamentos y en particular la celda central o de medición, así como el largo estándar.

Una vez que el presiómetro ha sido armado, el sistema de medición de volumen, incluyendo la tubería y la celda de medición se llena con agua o aire comprimido, utilizando agua limpia que no contenga sedimentos que puedan perturbar las lecturas del volúmetro, se puede utilizar

un colorante estándar, a temperaturas congelantes es factible emplear alcohol etílico en la proporción que se requiera . Esta operación debe realizarse con sumo cuidado ya que pueden quedar atrapadas burbujas de aire que alteren los cambios de volumen. Para una calibración del equipo se deben seguir las instrucciones de fabricación, y además se debe revisar el aparato en forma periódica ya que el sistema puede quedar saturado.

Antes del inicio de un ensaye debe realizarse una revisión del aparato que contemple:

los siguientes aspectos:

- 1.- El circuito de agua puede estar sujeto a un vacío; esto puede ocurrir por ejemplo si la sonda es bajada a cierta profundidad en un suelo muy seco.
- 2.- Siempre que la presión sea liberada o después de un ciclo de pruebas.
- 3.- Después de un ensaye especial o un largo periodo de prueba.

En cualquiera de estos tres casos se puede utilizar el aire comprimido o el dióxido de carbono(ambos muy solubles en agua).

La instalación es el proceso en que la sonda es introducida en la perforación de prueba , éste incluye bajado e izado de la sonda. Se tienen diversos problemas en la instalación de la sonda debido a las condiciones del suelo sumados a otros problemas que puedan surgir en el procedimiento lo cual es particularmente importante, ya que el método de instalación tiene efectos significativos sobre la forma de la curva de prueba y después en la interpretación de los parámetros. La instalación ideal es aquella en la que se provoca el menor remoldeo al suelo circundante.

Los presiómetros son usualmente instalados en perforaciones previamente barrenadas con equipo de rotación, a excepción de los presiómetro de auto perforación (SBP) y los presiómetros de empuje (FDP) que son instalados directamente desde la superficie o de una perforación creada con un equipo de percusión. El presiómetro auto-perforante (SBP) es

barrenado utilizando un equipo rotatorio propio, y el presiómetro de empuje (FDP) es instalado por hincado; un presiómetro de empuje puede ser instalado directamente en arcillas blandas a duras.

Generalmente es especificado el largo y diámetro de la perforación cuando se utiliza el presiómetro con perforación previa (PBP) y posiblemente el método de realización de la perforación específica si la prueba lo requiere. Una perforación para el presiómetro con perforación previa (PBP) puede ser realizada utilizando una gran variedad de técnicas pero la mejor es la que menos remueve los materiales y minimiza el remoldeo del suelo. Una perforación para un ensaye es realizada con base en uno de los métodos referidos en la tabla 2.3. La perforación puede ser ejecutada usando cualquier técnica de barrenado o de rotación, en ambos casos se requiere tener una perforación limpia y estable. La secuencia típica de operación se muestra en la fig. 2.10

La secuencia de operaciones para el presiómetro auto-perforante (SBP) y para el presiómetro de empuje (FDP) para crear su propia perforación desde la superficie del suelo o en la base de la perforación puede ser similar en ambos equipos. La técnica de barrenado utilizada en el avance de la perforación tanto en el presiómetro auto-perforante (SBP) como en el presiómetro de empuje (FDP) no es crítica en la forma del ensaye presiométrico, ya que la perforación debe estar limpia, estable y la técnica utilizada no debe alterar las condiciones del suelo en forma significativa donde se va a realizar el ensaye presiométrico.

Las técnicas de barrenado que producen perforaciones limpias y estables incluyen tubería, barrena y cabeza giratoria.

Las perforaciones realizadas en arcillas blandas pueden necesitar ser estabilizadas para evitar un colapso al momento de introducir la sonda en la perforación. Las perforaciones realizadas en arenas, arcillas con poca arena y roca blanda suelen estabilizarse con ademe o lodo. Si la sonda se pierde por alguna razón, los costos incluyen la sonda, así como el pozo y la reperfuración. Por esta razón los operadores de los barrenos para realizar una perforación deben tomar precauciones para evitar un colapso en la perforación.

Tipo de suelo		Equipo manual		Armazón , equipo de barrenado y equipo giratorio				Equipo giratorio				
		barrenado manual	barrenado manual con lodo	unidad de muestra	unidad de muestreo	muestra alterada	perforación por empuje	perforación y limpieza	corazon del rodillo	percusión giratoria	perforación abierta	trayectoria del barreno
arcilla	blanda	2B	1	NR	NR	2B	2	2	NR	NR	2B	NR
	firme a rígido	1B	1	NR	NR	1	2	2	NR	NR	1B	1B
	rígido a duro	NA	NA	2	NR	2	1	1	1B	NR	1	1B
aluvion	superior GWL	1	2	2	NR	2B	2	2B	NR	NR	1B	NR
	inferior GWI	NR	1	NR	NR	NR	NR	2B	NR	NR	1B	NR
arenas	suelta y superior GWL	2	1	2	NR	NR	NR	2	NA	NR	1B	2
	suelta y cerca GWL	NR	1	NR	NR	NR	NR	2	NA	NR	1B	NR
arenas y gravas	mediano a densa	1	1	2	NR	NR	NR	2	NR	2B	1B	2
	suelta	NA	NA	NR	2	NA	NA	NA	NA	2	2	NA
	densa	NA	NA	NR	ID	NA	NA	NA	NA	2	NR	NR
rocas	roca blanda	NA	NA NA	1	NR	NA	2B	NA	1	2	1	NA
	roca maciza	NA		NA	NA	NA	NA	NA	1	2B	2B	NA

1.- recomendable 2.- aceptable NR.- no recomendable NA.- no aplicable B.- condicional D.- pilote con perforación previa

Tabla 2.3 .- métodos recomendados para la realización de perforaciones para el Presiómetro con perforación previa (PBP) (Johoston, 1990 , Shuttle, Clarke, 1993)

Una perforación para el presiómetro auto-perforante(SBP) es normalmente realizada con una unidad alterna con equipo rotatorio de tubo interior (fig. 2.11) , el lodo es inyectado directamente en el interior del tubo para cortar y pasa a través del espacio anular entre el anillo interior y el exterior del tubo hacia la superficie, en donde es recolectado en un depósito.

La velocidad de avance , presión del lodo y posición de corte son ajustados en el presiómetro auto-perforante(SBP) , se reemplaza el suelo con lodo y entonces la sonda avanza , lo cual está bajo el control del operador.

Usualmente la profundidad de prueba no afecta los parámetros.

Un presiómetro de empuje (FDP) es hincado en el suelo a una velocidad constante generalmente a 2 cm/s, usualmente el cono estándar está en la base de la perforación o en la superficie del suelo.

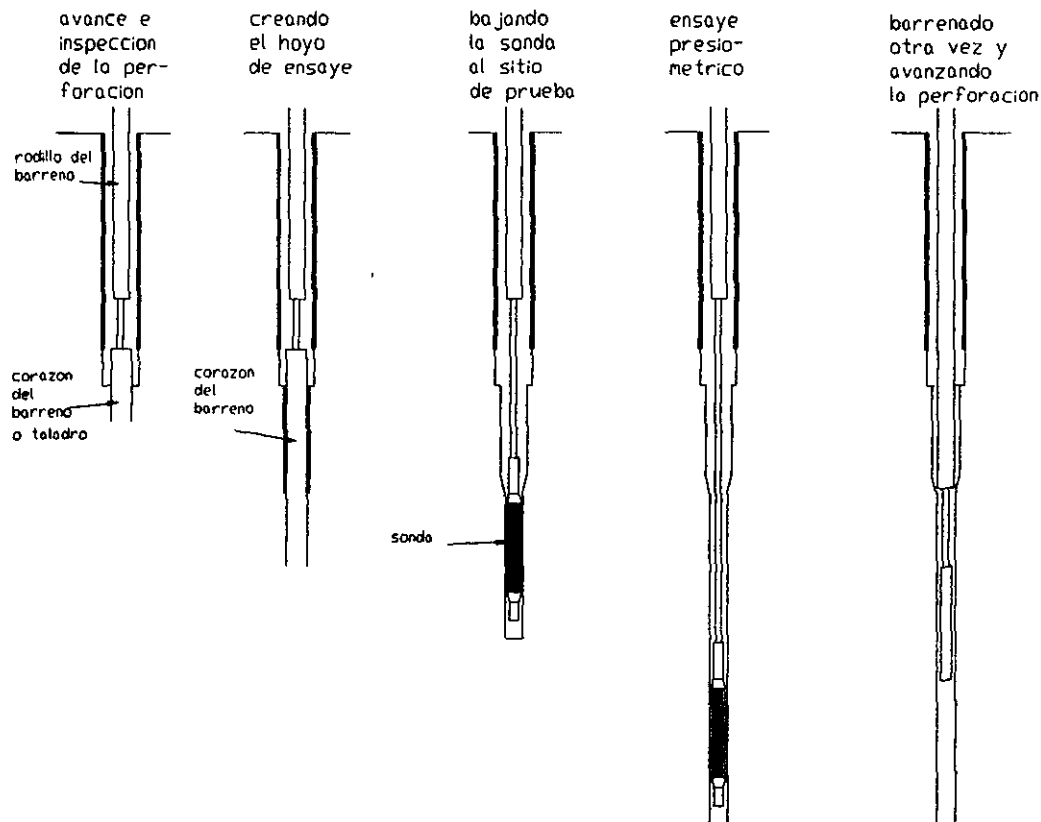


fig. 2.10 Secuencia típica de la instalación del presiómetro de perforación previa (PBP), (se puede seguir una secuencia similar para los presiómetros de auto - perforación(SBP) y para el de empuje (FDP).)

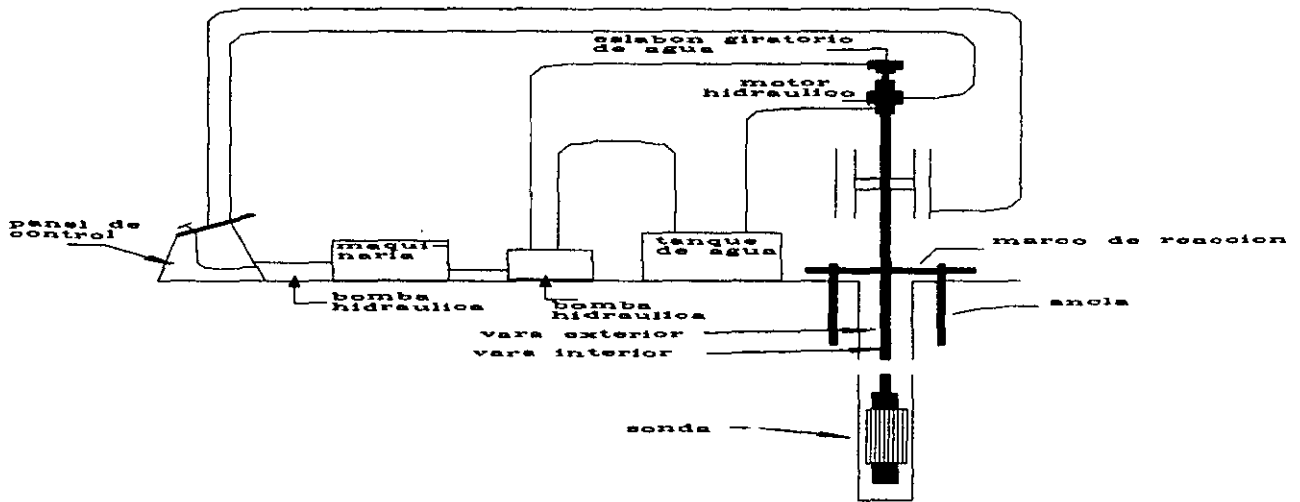


Fig. 2.11 Sistema de barrenado del presiómetro de auto - perforación

Normalmente de un ensaye presiométrico se obtiene en particular un perfil de las propiedades del suelo. La separación mínima para realizar un ensaye presiométrico es de un metro para asegurar que el ensaye actual no es afectado por uno previo. El centro de la sección expandida es menor a medio metro, por lo que la mitad de la sección expandida bajo la base de la perforación minimiza los efectos ocasionados a la perforación durante la instalación, sobre los resultados del ensaye presiométrico; si esto no es posible se deberán analizar las dificultades o condiciones del suelo durante la realización del ensaye presiométrico. Es necesario especificar la longitud de la perforación cuando se utiliza un Presiómetro con perforación previa (PBP); el largo de las perforaciones de los presiómetros de empuje (SBP) y auto perforantes (FDP) son fijados por el largo de la sonda. Un ensaye con el presiómetro con perforación previa (PBP) permite que el largo de la perforación sea variable, contrario a lo que sucede con un ensaye con el presiómetro auto perforante (SBP) donde se maneja un largo específico.

Es antieconómico combinar muestreo y otras pruebas in situ con ensayos presiométricos en la misma perforación.



## II.5 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.

La frecuencia y propósito de los tres tipos de calibraciones se dan en la tabla 1.4 .

Los desplazamientos mostrados en la tabla de calibración son comparados con los desplazamientos medidos. La rigidez de la membrana es medida al inflar la sonda con aire, todas las calibraciones son obtenidas al aplicar una presión en la sonda colocada en un cilindro. Generalmente se cuenta con un registro de todas las calibraciones realizadas a una sonda, el cuál debe ser conocido por el operador, la historia de calibraciones permite saber si el equipo está trabajando correctamente.

Todas las sondas de desplazamiento radial contienen transductores. La señal de salida ( voltaje) de los transductores es convertida a presión por un factor de calibración. En este factor debe indicar si existe histeresis y no linealidad.

La presión conocida como rigidez de membrana es la presión aplicada durante el ensaye presiométrico con el objeto de determinar la presión de la interface membrana - suelo. La calibración se debe aplicar a todos los ensayes presiométricos y siempre que sea necesario reemplazar la membrana, esto puede ocurrir en diversas ocasiones por daños durante la instalación y en el desarrollo del ensaye presiométrico. Esta es corrección importante sobre todo en arcillas blandas y arenas sueltas, o ensayes cerca de la superficie del suelo, pero en la práctica ella se aplica rutinariamente.

El cambio en el espesor de la membrana debido a la presión es pequeño y sólo significativo para ensayes en roca utilizando sondas de desplazamientos radiales. No es necesario realizar la calibración si se está ensayando el suelo con sondas de desplazamientos de volumen. El sistema se presenta flexible al cambio de volumen el cual ocurre al abastecer las líneas, el tipo de sondas de desplazamiento de volumen sólo son aplicables en los ensayes con equipo presiométrico Menard.

Calibración	Perforación previa		Auto perforante y empuje	Frecuencia	Calibraciones adicionales	Propósito		
	volumen	radial				Suelo blando presión max. 1 Mpa.	Suelo intermedio presión max. 4 Mpa.	Suelo duro presión max. 20 Mpa.
transductores	ajustar	si	si	1.- Al principio y final del proyecto 2.- Intervalos regulares durante el proyecto	1.- Cualquier cambio en los transductores 2.- Cambio de tubo que conecta la sonda con la superficie 3.-Deterioro de la sonda atrevas de limpiezas y desecamiento	critico	critico	critico
sistema de copliance	si	no	no	1.- Al principio y final del proyecto 2.- Intervalos regulares durante el proyecto	1.- Cambio de tubo que conecta la sonda con la superficie 2.- Cambio en la unidad de control	importante	importante	importante
membrana rígida	si	si	si	1.- Al principio y final del proyecto 2.- Intervalos regulares durante el proyecto 3.- Eventualmente es remplazada la membrana	- - - - -	critico	importante	no importante
membrana a compresión				1.- Al principio y final del proyecto 2.- Intervalos regulares durante el proyecto 3.- Eventualmente es remplazada la membrana	- - -	innecesario	no importante	critico
membrana delgada	no	si	si	----- -----	-----	no importante	no importante	critico
cero	si	si	si	antes de introducir en el interior de la perforación	-----	critico	critico	critico

Tabla 2.4. Frecuencia y propósito de calibraciones

## II.6 REALIZACION DEL ENSAYE PRESIOMÉTRICO

El ensaye presiométrico es la aplicación de presión a las paredes de una perforación, esta acción requiere de cierto tiempo para permitir el equilibrio de la presión de poro. Este tiempo no esta incluido en la instalación de la sonda. Todos los ensayos a esfuerzo controlado se realizan aplicando pequeños incrementos de presión hasta lograr expandir la membrana aproximadamente a un desplazamiento constante. Un ensaye presiométrico a esfuerzos controlados es aquel en donde el incremento de presión se mantiene por uno o dos minutos. Los ensayos en roca realizados con sonda de desplazamiento de volumen conducen a ensayos a esfuerzo controlado.

Los ensayos presiométricos en suelos con sondas de desplazamientos radiales mantienen una deformación controlada( utilizando pequeños incrementos de presión); se tiene un límite impuesto al aumento del radio de la sonda provocada por el incremento de presión, lo cual es muy importante si se utilizan los presiómetros auto perforantes (SBP) o los presiómetros de empuje (FDP). Esto permite prevenir daños al equipo y también a la rápida expansión.

Normalmente los ensayos con ciclo de carga y descarga se realizan a esfuerzo controlado

Los procedimientos de ensaye más comunes se detallan en la tabla 2.5.

Cuando se utiliza el procedimiento de ensaye Menard se obtienen el módulo presiométrico Menard y la presión límite, los cuales son parámetros de diseño empíricos. En cada ensaye se obtiene el esfuerzo horizontal total, el módulo de rigidez al esfuerzo cortante y la resistencia, parámetros que dependen de la sonda , forma de instalación , procedimiento de ensaye e interpretación de los resultados.

Los ensayos presiométricos son generalmente realizados para caracterizar las capas del subsuelo. El módulo de rigidez al esfuerzo cortante se toma apartir de un ciclo de carga y descarga. Un ensaye presiométrico completo incluye una curva con la etapa de carga, a la máxima capacidad de carga requerida , la cual es menor que la capacidad de la sonda.

Un ensaye presiométrico puede ser incompleto por alguna de las siguientes razones.

- a) La presión máxima de la sonda es insuficiente por lo general la de fluencia ( esto es común en ensayes presiométricos en rocas)
- b) La membrana se rompe debido a una mala instalación, durante el ensaye por discontinuidades en el subsuelo, o por expansión del anillo interior entre la pared de la perforación y el corazón del brazo.
- c) La capacidad del depósito de aceite es superada por una expansión no uniforme.
- d) El largo de la perforación es mayor debido a la dificultad en su realización.

Nombre	Tipo	Sonda	Condiciones del suelo	Intervalos de lectura (seg.)	Esfuerzo	Deformación
pendiente	esfuerzo	MPM otros PBP con deformación max. de 50%	todos	15,30,60	$p_{tm}/10$	
Pendiente	esfuerzo	PBP	roca	no especificado	no especificado	
pendiente	esfuerzo	PBP	todos	30	25 a 200 kN/m <sup>2</sup>	0.05-0.1 x $v_0$  1%/min. 5%/min. 1%/min. durante la fase de carga 0% durante la sesión
pendiente	deformación	PBP	todos	30	25 kN/m <sup>2</sup> varios	
	esfuerzo	PBP	tierra vegetal	varios		
	esfuerzo	TODOS	todos	10 a 30		
	deformación	SBP	todos	10 a 30		
	deformación	FDP	todos	10 a 30		
	deformación	TODOS	todos	10 a 30		

tabla 2.5. Resumen de procedimientos de prueba utilizados comúnmente

### PRUEBA MENARD

Este es un ensaye especial de esfuerzo controlado, formando parte de una completa especificación que cubre la sonda, la instalación y, el ensaye e interpretación.

Es utilizada para obtener parámetros de diseño directamente de los desplazamientos de volumen de las sondas de perforación previa de tres celdas (dos celdas de guardia y una celda de medición o central) . La sonda es introducida en una perforación previamente realizada y se expande aplicando alrededor de 10 a 15 incrementos iguales de presión hasta que el volumen de la perforación sea aproximadamente el doble del tamaño inicial, se deben realizar como mínimo ocho y un máximo de 15 incrementos de presión. Cada incremento se mantiene por un minuto y se registran las lecturas del cambio de volumen a los 15,30 y 60 segundos(fig.2.12 a).

La prueba debe realizarse muy lentamente, y se debe tener un pronostico de la magnitud de la presión límite, lo cual es fácil de saber una vez realizado el primer ensaye.

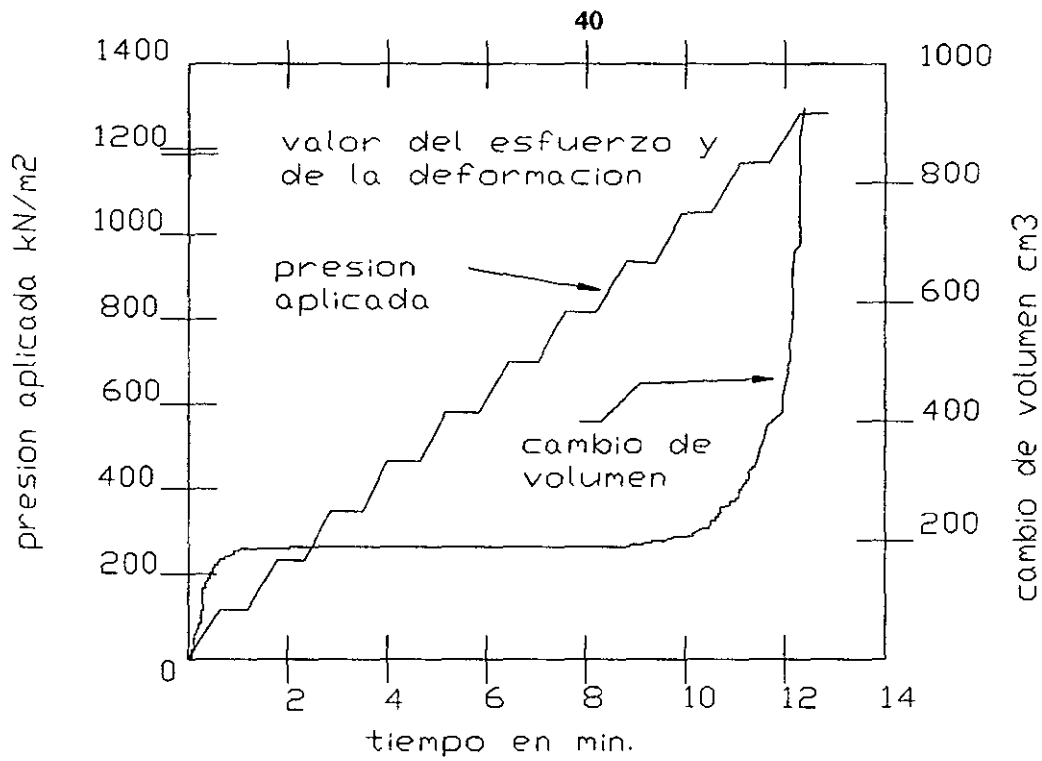


fig. 2.12 a) prueba a esfuerzo controlado

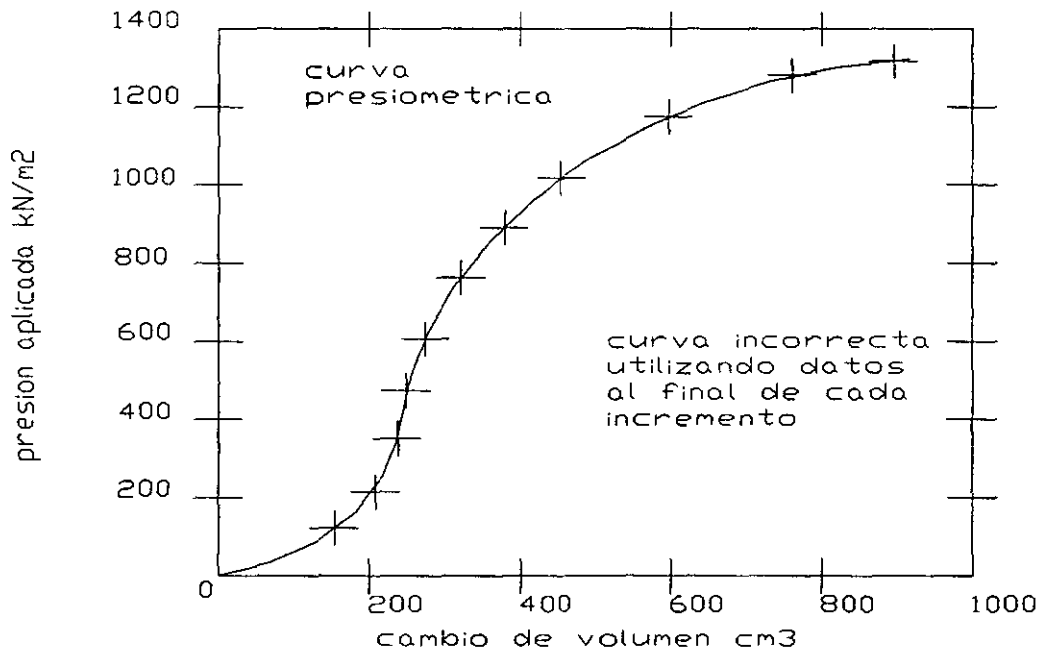


fig. 2.12 b) prueba a esfuerzo controlado

Una vez que la presión límite es estimada, ésta se divide entre 10 para dar los incrementos de presión que se van a utilizar en el ensaye presiométrico, por ejemplo si la presión límite es estimada en  $P_l=900$  kPa (135 psi), se divide entre 10 intervalos ( $900/10$ ), se toman incrementos de 100 kPa cada uno, una vez que las lecturas están en cero en la unidad de control, es decir, a la presión atmosférica sobre el manómetro de la celda de medición o central. Entonces empieza el ensaye presiométrico, el primer incremento de presión es aplicado al circuito de la celda central o de medición, se toman las lecturas del nivel del agua en el volúmetro a 15, 30, 60 segundos(fig. 2.12 b), hay que asegurarse que la presión se mantenga en ambas celdas (celdas de guardia y celda central o de medición). si esta cae repentinamente es probable que la membrana haya explotado y la prueba se termina, si la presión varía ligeramente es posible que el problema se solucione con ajustar los valores requeridos ,generalmente estos ajustes se detallan en las instrucciones de fabricación y se pueden realizar en el transcurso del ensaye presiométrico.

Después de la lectura de 60 segundos la presión se aumenta al siguiente nivel y el ensaye se continua hasta que la presión límite es alcanzada, realmente el ensaye es realizado hasta que el volumen de la cavidad es el doble del volumen inicial.

La calidad de la perforación es un paso muy importante para realizar satisfactoriamente el ensaye presiométrico. Dos condiciones son requeridas para obtener una buena calidad de la perforación: el diámetro de la perforación debe tener ciertas tolerancias, así como el equipo y los métodos utilizados, para lograr minimizar el remoldeo del suelo y de las paredes de la perforación. Si el diámetro del barreno es  $D_1$ , el diámetro de la sonda es  $D_2$  y el diámetro inicial de la perforación es  $D_3$ , entonces las tolerancias del diámetro son :

$$D_2 \leq D_1 \leq D_3$$

$$1.03 D_2 \leq D_3 \leq D_2$$

Estas tolerancias ayudan a que la perforación no sea muy pequeña y que tampoco sea muy larga, si la perforación es muy pequeña presenta dificultades para bajar la sonda y la curva (a) de la figura 6 solo se define parcialmente, y si la perforación es muy larga la curva (b) de la figura 6 no se pueden obtener.

Si una perforación está mal realizada, con un volumen mayor al de la sonda, la presión límite no puede ser alcanzada .

El operador debe llevar un registro completo de la prueba, debe evaluar el volumen  $v_0$

Dicho registro consiste esencialmente en :

1) Con base en las notas de campo (tabla 2.6), se lleva un registro de las lecturas de presión y volumen.

a).- La diferencia durante cada incremento de presión , en este caso la diferencia entre la lectura volumétrica a 60 y a 30 segundos es calculada , por ejemplo, para un incremento de presión de 300 kPa la diferencia  $190-188=2 \text{ cm}^3$ .

b).- La deformación entre dos incrementos calculados sobre la base de la lectura a un minuto, puede utilizarse como un índice de la evolución del ensaye presiométrico. Usualmente la diferencia es utilizada a juicio del operador ya sea en la fase plástica del ensaye o en la fase pseudo - elástica.

2 .- El dibujo de la curva natural del presiómetro (fig. 2.13), en este caso el trazo es realizado de las lecturas del volúmetro al final de cada incremento de presión a 60 segundos.

Un ensaye Menard Típico muestra la proporción del esfuerzo y de la deformación durante el ensaye y la curva utilizada para la interpretación.



ENSAYE PRESIOMÉTRICO	TRABAJO _____	FECHA _____
	SITIO _____	TECNICO _____

PERFORACIÓN No. 24 DIAMETRO 60 mm TIPO: MANUAL CON LODO BENTONITICO									
PROF.: 7 M MANOMETRO HT.: 0.6 M NIVEL DEL AGUA: 4.5 M SUELO: ARCILLA									
VOLÚMETRO No. 424 GC DIAMETRO DE SONDA: BX MEMBRANA: STANDAR DE PLASTICO									
REC PRESION DIF: 110 KpA PRESIÓN DEL AGUA 0.10(Z+Ho): 14 KpA DIF REQ: -36 KpA									
presión kPa	tiempo seg.	volumen cm <sup>3</sup>	presión celda guardia o dif. kPa	diferen- cia <sup>1</sup> ----- cambio	presión kPa	tiempo seg.	volumen cm <sup>3</sup>	presión celda guardia o dif. kPa	diferen- cia <sup>1</sup> ----- cambio <sup>2</sup>
0		8							
100	15	129	-36	5	900	15	295	-35	14
	30	143	-36			30	309	-36	
	60	148	-37	140		60	323	-36	58
200	15	175	-38	3	1000	15	376	-39	24
	30	178	-39			30	395	-37	
	60	184	-38	33		60	416	-36	93
300	15	186	-36	2	1100	15	540	-50	58
	30	188	-36			30	590	-55	
	60	190	-36	3		60	648	-45	232
400	15	194	-35	2	1140	15	750		
	30	198	-36			30			
	60	200	-36	10		60			
500	15	205	-36	2		15			
	30	207	-34			30			
	60	209	-34	9		60			
600	15	214	-37	3		15			
	30	217	-36			30			
	60	220	-36	11		60			
700	15	225	-35	5		15			
	30	228	-36			30			
	60	233	-37	13		60			
800	15	252	-40	7		15			
	30	258	-40			30			
	60	265	-40	32		60			

1 V60-V30	2 V60-V60	referencia de la membrana
inicio de ensaye	final de ensaye	resistencia ___ R 245-78

Observaciones: diferencia de presión a 1100 kPa  
temperatura 20 °C

tabla 2.6 notas de campo de un ensaye presiométrico

presión límite 940 kPa     $E_m$  8490 kPa

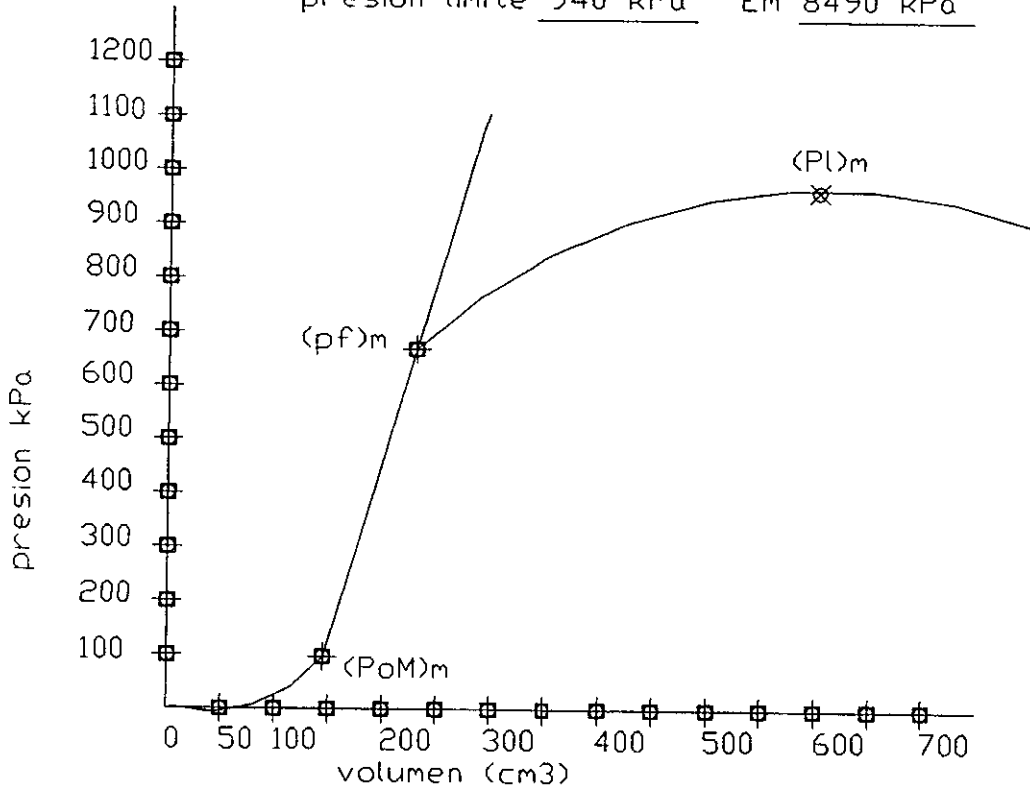


fig. 2.13 Curva del ensayo presiométrico

## ENSAYES A ESFUERZO CONTROLADO

En este tipo de ensayos generalmente se utilizan más incrementos de presión que en los ensayos tipo Menard y cada incremento se mantiene por un periodo de tiempo más largo, generalmente por encima de los dos minutos. Se puede incluir un ciclo de carga y descarga y la descarga al final de la prueba.

Este procedimiento no está estandarizado pero hay un reducido número de procedimientos reconocidos como buenos en la práctica. La forma de la curva final es similar a la mostrada en la fig. 1.12 a, en el caso de los ensayos con los presiómetros auto perforantes (SBP) y los de empuje (FDP) la membrana solo puede moverse una vez que la presión interna aplicada a la sonda excede a la presión externa ejercida por el suelo.

## ENSAYES A DEFORMACION CONTROLADA

Se refiere a los procedimientos usuales seguidos en los ensayos con presiómetros auto perforantes(SBP) y los de empuje (FDP), donde se tiene una combinación de esfuerzos y deformaciones controladas durante el ensaye, como se muestra en la fig. 1.14 a. La presión es aumentada en pequeños incrementos hasta que la membrana se expande hasta el valor requerido de esfuerzo, usualmente 1% /min para un ensaye con presiómetro auto perforantes(SBP) y 5% /min. para un presiómetro de empuje(FDP), esto se hace antes del ciclo de carga y descarga para ensayos a esfuerzos controlados. El ensaye a deformación controlada es posible con sondas de desplazamiento radial, si se utiliza una bomba, aunque este procedimiento no es usual.

Usualmente los ensayos a deformación controlada se llevan a cabo con sondas de desplazamiento radial usando presiómetros auto perforantes (SBP) y de empuje (FDP), donde los datos son registrados automáticamente

Los datos se registran entre 10 y 20 segundos permitiendo una buena definición de la curva experimental. Estos ensayos pueden incluir un ciclo de carga y descarga. Esto es recomendable para ensayos en rocas y arenas donde la presión se puede mantener constante antes de la descarga hasta que el valor de la deformación se reduce a cero. Esto evita la expansión debida al flujo plástico durante la descarga. El ensaye a deformación controlada se limita a arcillas donde se puede tener una falla por ruptura y se conoce la evolución de la presión de poro a medida que cavidad se expande a volumen constante.

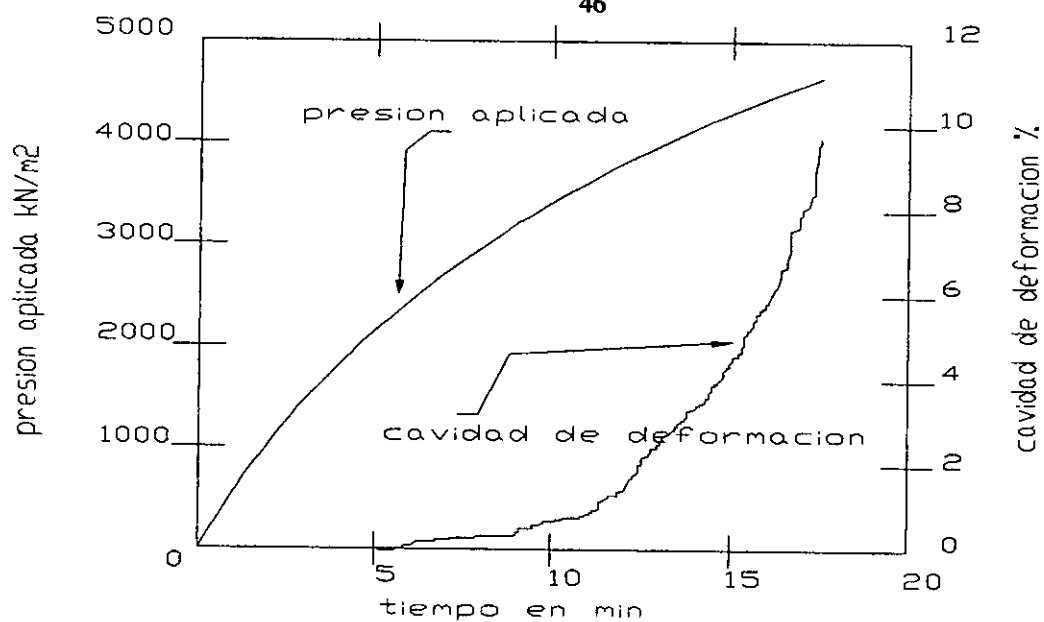


FIG. 2.14 a) Prueba a deformación controlada con un valor máximo de incremento de presión

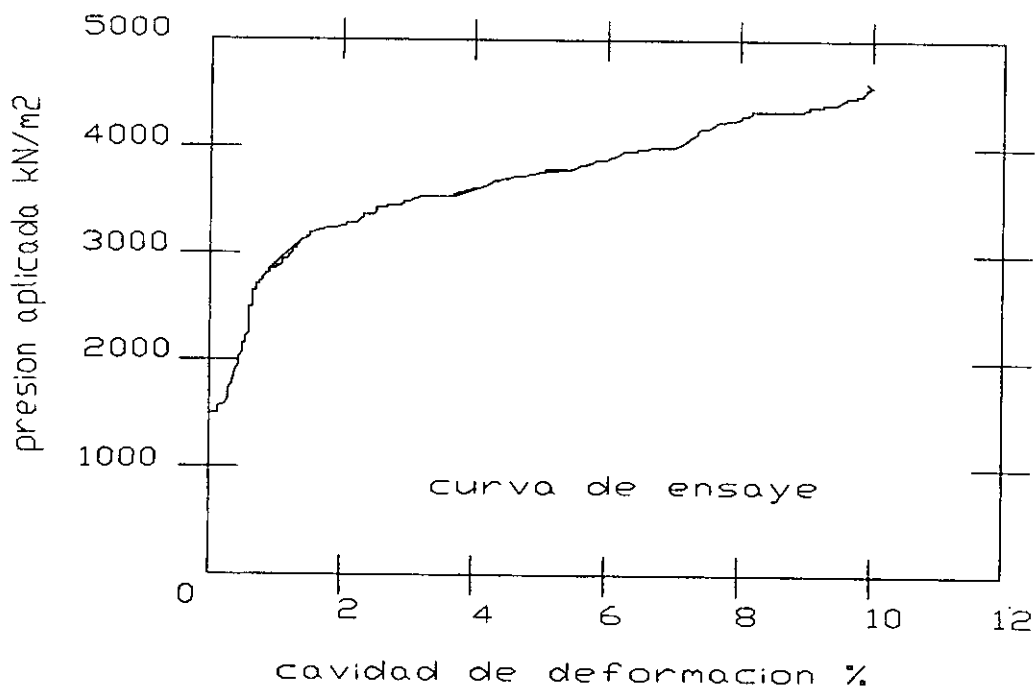


Fig. 2.14 b. Prueba de deformación controlada con un valor máximo de incremento de presión

## ELECCION DE UN PRESIOMÉTRO.

Los presiómetros son utilizados para obtener:

- 1.- Parámetros de diseño directos (prueba Menard)
- 2.- Propiedades del subsuelo rápidamente ( al mismo tiempo del ensaye )
- 3.- Módulo de rigidez al esfuerzo cortante
- 4.- Perfil presiométrico
- 5.- Esfuerzo horizontal total
- 6.- Resistencia no drenada en arcillas o el ángulo de fricción interna en arenas

En la fig. 2.15 se presenta una guía para poder elegir el presiómetro tomando en cuenta las condiciones que se presenten.

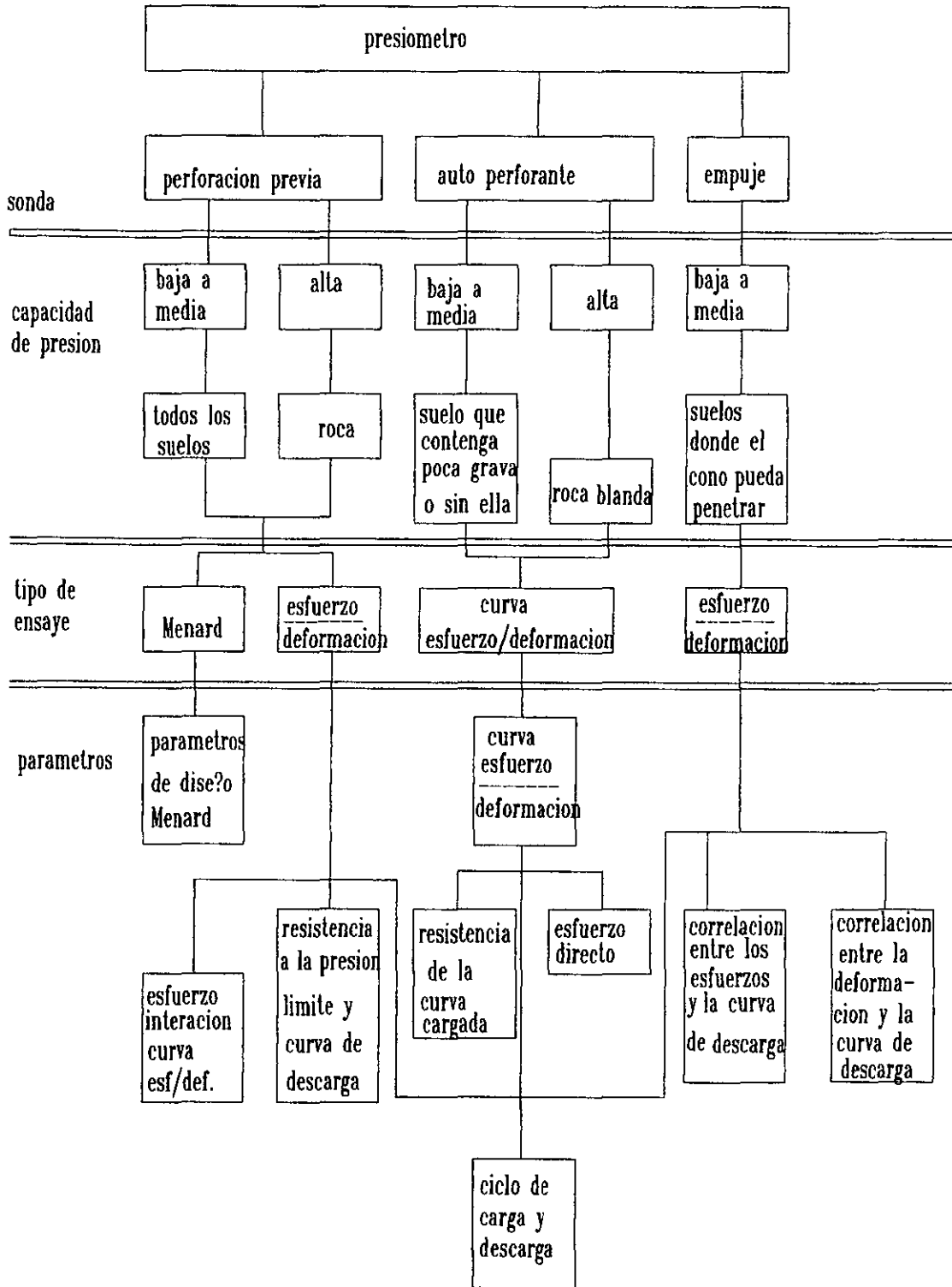


Fig. 2.15. Guía para la elección del presioméetro

## II.7 FACTORES QUE AFECTAN EL ENSAYE PRESIOMÉTRICO.

Existen diversas causas que afectan el ensaye presiométrico, siendo las mas importantes las condiciones del terreno, procedimientos incorrectos de operación y mala colocación de la sonda. El ingeniero tiene que elegir el presiómetro que desea utilizar, así como la forma de realizar la perforación, frecuencia y tipo de calibración, procedimiento de ensaye y método de interpretación de los resultados del ensaye. El presiómetro, la realización de la perforación y el procedimiento de ensaye deben ser compatibles con los resultados requeridos y con las condiciones del terreno. Si no se tiene conocimiento de lo que se espera obtener, ésto ocasionará problemas en el sitio de prueba.

Las condiciones del terreno afectan a la perforación y por consiguiente a la curva del ensaye presiométrico, ocasionando que no se pueda realizar una perforación estable o con las correctas dimensiones, lo que provoca que los costos se eleven , entonces el operador con base en observaciones y con la experiencia previa en sitios de operación similares de terreno deberá formular la medida correctiva. Los tres errores mas comunes son una prueba incompleta, perforación de ensaye sobredimensionado y tiempo de ensaye.

El ensaye presiométrico puede terminar cuando la membrana se rompe o la capacidad de volumen se excede , en ambos casos los parámetros requeridos no se pueden obtener.

Para la ejecución un ensaye presiométrico se requieren generalmente tres operadores, dos personas operando el equipo de perforación y un técnico que ejecuta la prueba.

## **CAPITULO III**

### **INTERPRETACION DE RESULTADOS DEL ENSAYE PRESIOMETRICO.**

- III.1.-** Esfuerzo horizontal total.
- III.2.-** Módulo de deformación al esfuerzo cortante.
- III.3.-** Resistencia al corte no drenada.
- III.4.-** Angulo de fricción interna.
- III.5.-** Parámetros Menard.



## INTERPRETACION DE RESULTADOS DEL ENSAYE PRESIOMÉTRICO.

El ensaye presiométrico ideal es aquel donde la expansión in situ es una cavidad cilíndrica en que los esfuerzos iniciales internos son iguales in situ a los esfuerzos horizontales geoestáticos. El resultado de la curva esfuerzo deformación es una medición real de la respuesta del terreno y los parámetros obtenidos representan la estratigrafía y resistencia del terreno. En la práctica el terreno adyacente a la sonda es afectado por el proceso de instalación, los parámetros obtenidos son función de las consideraciones realizadas y el modelo matemático utilizado para la interpretación.

Con el objeto de calibrar los resultados obtenidos con el presiómetro y ganar seguridad en su empleo, existen un gran número de comparaciones con otras pruebas de resistencia. Sin embargo estas comparaciones no son del todo correctas. Ya que los diversos parámetros obtenidos dependen del procedimiento para realizar el ensaye presiométrico, como es el caso del módulo de rigidez al esfuerzo cortante de un ensaye presiométrico en arcillas blandas que siempre resulta mayor comparado con el obtenido en una prueba triaxial.

Varios procedimientos de diseño simples están basados en un procedimiento específico de prueba. La capacidad de apoyo de una cimentación superficial sobre arcillas se basa en la resistencia al esfuerzo cortante derivado de una prueba triaxial. Por eso, si un parámetro depende del procedimiento de prueba, los resultados obtenidos de otras pruebas deben ser utilizados con suma precaución, al cambiar de un modelo de comportamiento a otro.

Sólo recientemente con modelos más elaborados y usando métodos numéricos se ha podido vislumbrar un modelo más exacto del comportamiento del suelo. Un ensaye presiométrico suministra una curva esfuerzo deformación no lineal, que puede ser utilizada por los métodos de análisis más avanzados, que permitan predecir la respuesta del terreno y compararlas con observaciones actuales.

Se han desarrollado tres métodos de interpretación de los ensayos presiométricos: interpretación empírica que da parámetros de diseño directos (método A); integración de un modelo esfuerzo - deformación obtenido de la curva presiometrica (método B); y elaborar una curva con los datos del ensaye presiométrico y comparar con la curva esfuerzo - deformación al cortante (método C).

El método A fue desarrollado por Menard y el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées(LCPC), el cual está basado en correlaciones entre observaciones de estructuras a escala natural y curvas de ensayos presiométricos. Los parámetros se toman de la curva de prueba, la cual es función de la sonda, instalación y procedimiento de ensaye y son utilizados en métodos de diseño especialmente desarrollados para el ensaye presiométrico. Cualquier variación del procedimiento especificado invalida los resultados. Esto es similar a los métodos empíricos desarrollados para otros procedimientos de ensaye.

El método B es capaz de cuantificar la rigidez y resistencia del terreno. Adopta modelos de suelo; plástico perfecto, elasto - plástico, hiperbólicos y parabólicos. Varios de estos modelos propuestos no son utilizados en la práctica debido a los efectos de instalación y las diferencias importantes entre el comportamiento real del suelo y el predicho por el modelo.

El método C supone que la curva del ensaye presiométrico representa realmente la respuesta del terreno, sin embargo en la práctica el terreno natural resulta siempre perturbado por los efectos de la instalación. Este hecho debe ser tomado en cuenta limitando el análisis a las partes de la curva que no son afectadas por la instalación.

La interpretación de los ensayos presiométricos está basada en teorías modificadas por la experiencia práctica que toman en cuenta los efectos de instalación y las condiciones del terreno, por lo tanto los resultados obtenidos dependen del método de interpretación utilizado.

## LA CURVA PRESIOMETRICA.

Los datos registrados durante el ensaye presiométrico son convertidos en presión aplicada y cambio volumétrico o deformación de la cavidad, estos datos a su vez deben ser corregidos tomando en cuenta la presión de la columna de agua y la curva de calibración de la sonda. Los datos se registran a ciertos intervalos iguales de tiempo, usualmente a 15, 30 y 60 segundos independientemente del tipo de prueba, o a intervalos relacionados con la aplicación de incrementos de volumen o de presión. En cualquier caso todos los datos son dibujados para generar la curva presiométrica; en pocos casos los datos al final de cada incremento son dibujados.

Las curvas típicas de un ensaye presiométrico con perforación previa(PBP), un presiómetro auto perforante(SBP), o un presiómetro de empuje (FDP) se muestran en la fig. 3.1 La forma de la curva indica la calidad del ensaye presiométrico, tipo de terreno y propiedades del suelo. Un ejemplo de la calidad de las curvas para un ensaye presiométrico con perforación previa(PBP), se muestra en la fig. 3.2(A) enfatizando los efectos de: i) perforación excesivamente larga, ii) capacidad de presión insuficiente y iii) membrana rota.

Ejemplos de calidad para ensayes presiométricos auto perforantes(SBP) en arcillas y arenas se muestran en la fig. 3.2 (B), y los efectos de los parámetros se muestran en la fig. 3.3

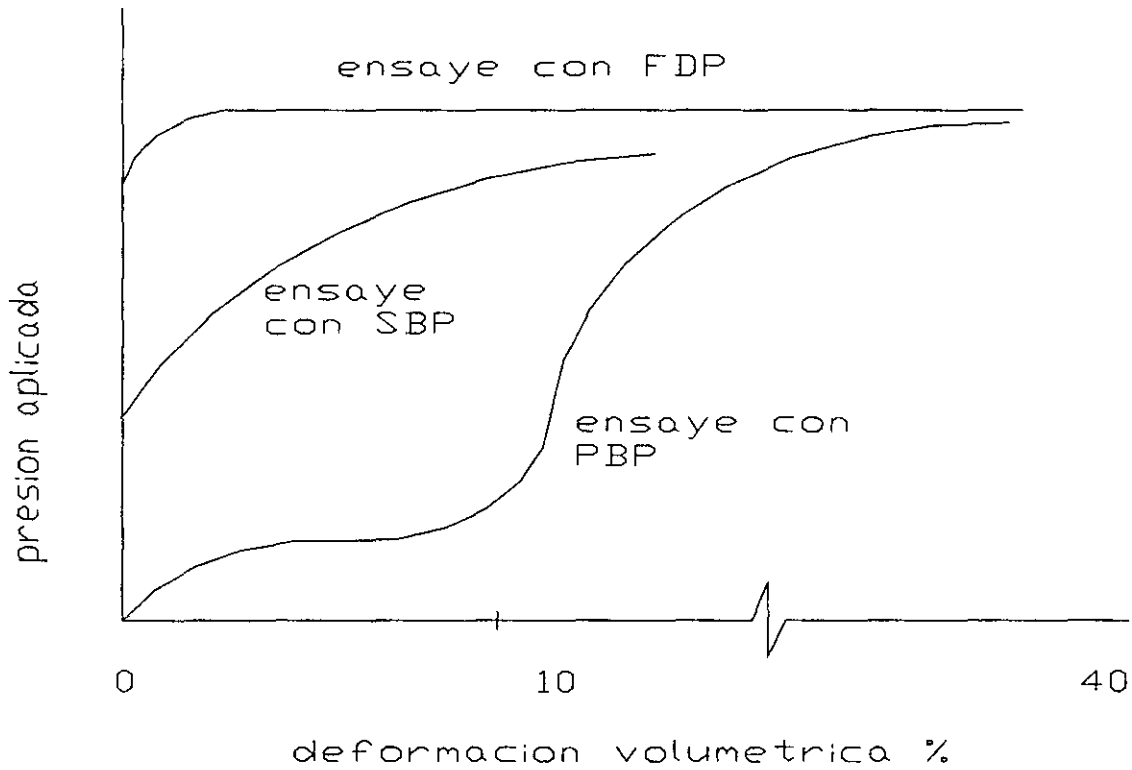


Figura 3.1.- Curvas típicas de los diferentes presiómetros

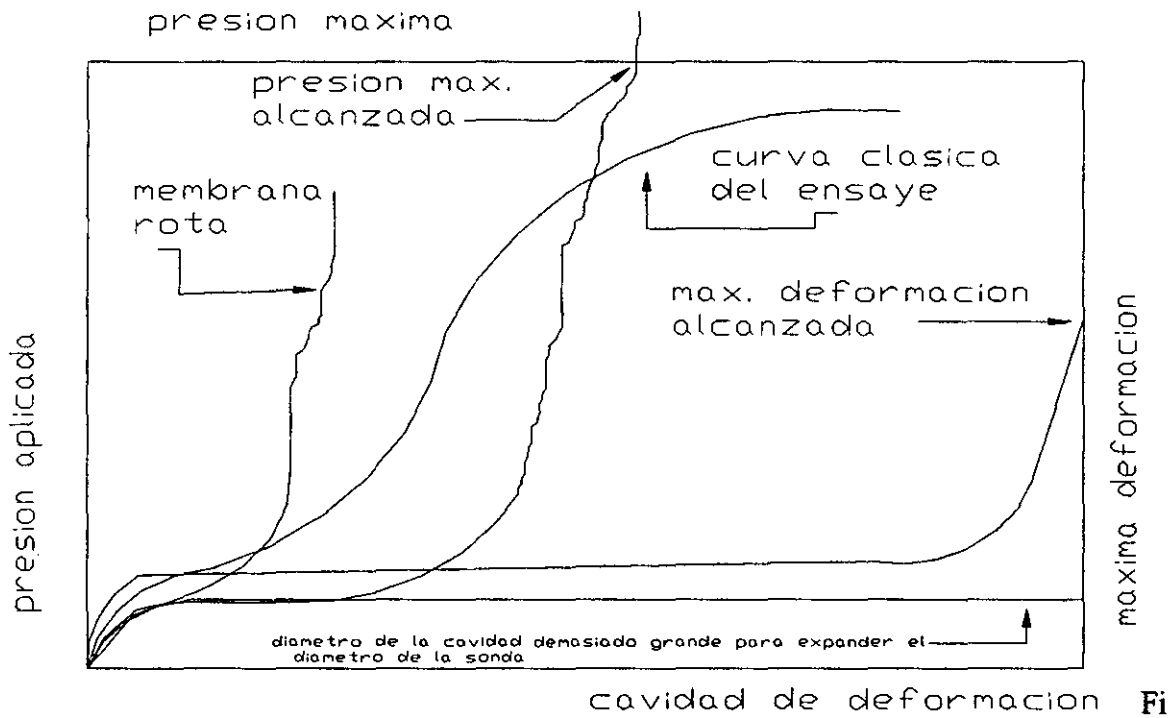


Figura 3.2 (A).- Las formas de las curvas presiométricas muestran los efectos de instalación y las condiciones del terreno para un Presiómetro con perforación previa(PBI).

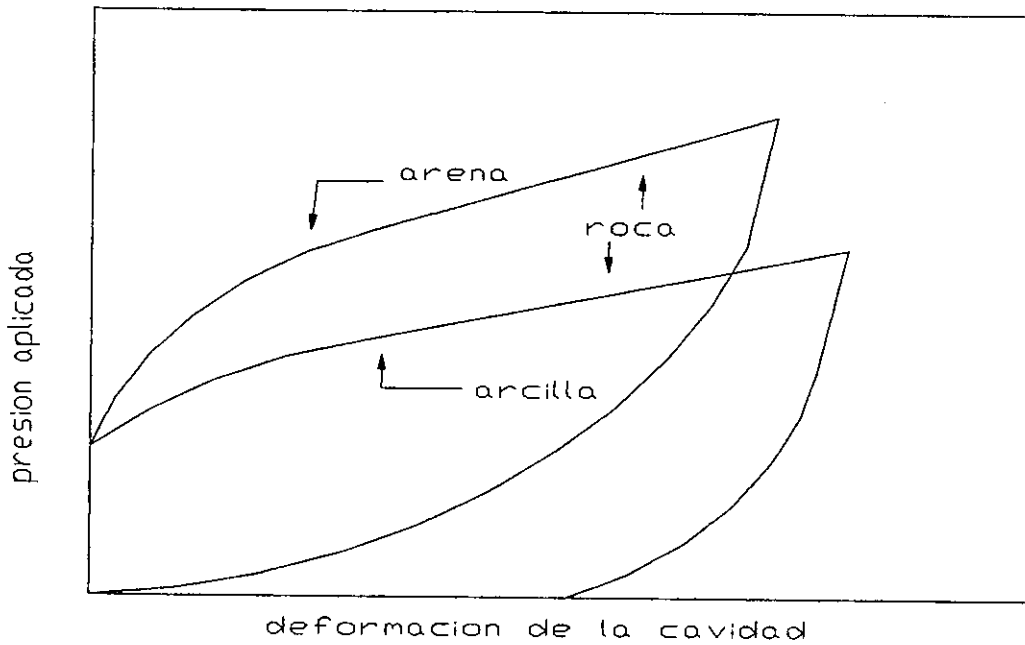


Figura 3.2 (B) .-Las diferentes formas de las curvas presiométricas muestran los efectos del tipo de terreno para un presiómetro auto perforante (SBP)

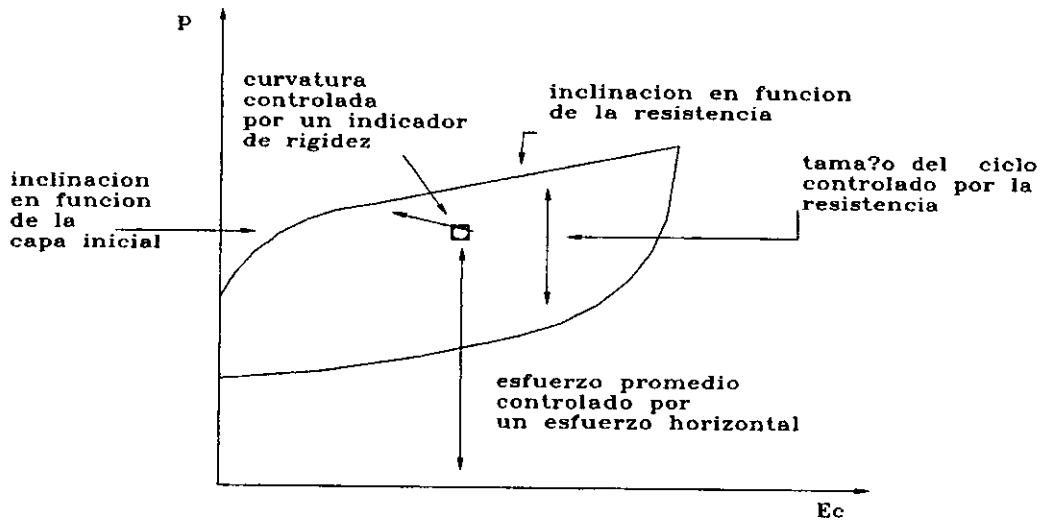


Figura 5.3 .- Los esfuerzos in situ , el módulo al esfuerzo cortante y la resistencia influyen en la forma de la curva presiométrica.

### EXPANSION DE UNA CAVIDAD.

Un ensaye presiométrico es la expansión de una cavidad cilíndrica, la teoría detallada se puede revisar en la literatura técnica (Menard, 1957). Esta teoría asume que la cavidad es infinitamente larga y los desplazamientos se producen en la dirección radial, existiendo un estado de deformación plana. Los presiómetros son instalados en perforaciones verticales por lo tanto las expansiones se producen en la dirección horizontal. Los esfuerzos geostáticos verticales son asumidos como esfuerzos intermedios. La geometría de una cavidad cilíndrica expandida se muestra en la fig. 3.4.

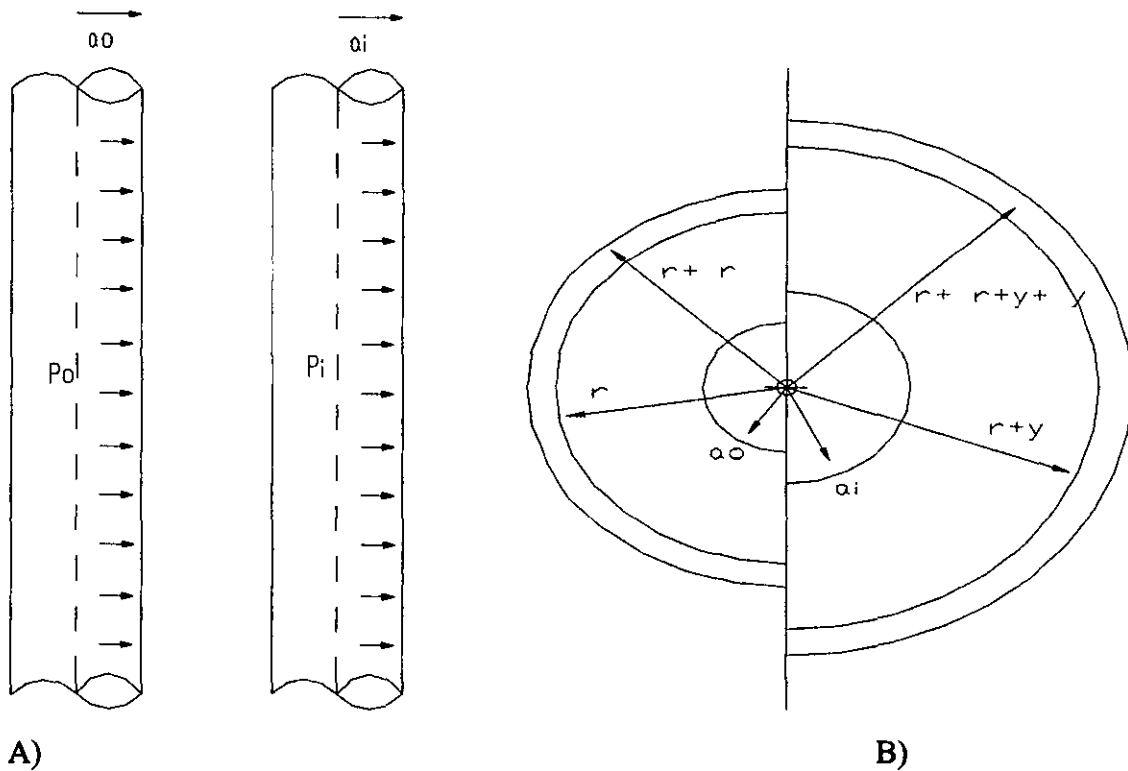
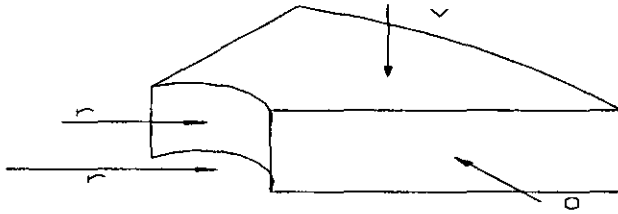


Fig. 3.4. Geometría de una cavidad cilíndrica comúnmente asumida para el análisis de los ensayos presiométricos

- A) Expansión de una cavidad cilíndrica
- B) Expansión de un elemento de radio  $r$
- C) Esfuerzo sobre un elemento de radio  $r$

Fig. 3.5 Radio de la cavidad.



Los desplazamientos medidos generalmente se expresan en términos de la deformación de la cavidad, la variación del radio de la cavidad original, y el volumen medido como deformación volumétrica, así la deformación de la cavidad y la deformación volumétrica están directamente relacionados. El radio de la cavidad con los esfuerzos horizontales totales se muestran en la figura 3.5, así como los datos de referencia. Estos datos solamente pueden ser obtenidos de un ensayo con un presiómetro auto perforante(SBP) donde la sonda es instalada con la mínima alteración del terreno, en todos los demás casos el dato de referencia es propuesto o calculado, usualmente con un procedimiento iterativo. Cambiando el dato de referencia puede cambiar el valor de los parámetros derivados de este, por lo que es de suma importancia proponer este dato con mucho cuidado.

Varias ecuaciones de equilibrio y compatibilidad pueden ser establecidas las cuales relacionan los esfuerzos con las deformaciones, para poder construir la curva presiométrica. En la tabla 3.1 se consignan algunos modelos desarrollados para interpretar los ensayos presiométricos en arenas, arcillas y roca blanda.

## ENSAYES EN ARCILLAS.

Los ensayos presiométricos en arcillas se realizan en condiciones no drenadas, por lo que no cambia de volumen la arcilla. Una curva ideal del ensayo presiométrico puede ser interpretada directamente y dar la curva esfuerzo deformación(Mair R. J., 1987), con esta ventaja no es necesario proponer un modelo para las arcillas. En la práctica, este método sólo es utilizado para interpretar partes de la curva del ensayo presiométrico y no da completa la curva esfuerzo deformación.

Comúnmente se propone que en la interpretación de los ensayos presiométricos realizados en arcillas, estas se modelen como un material elasto - plástico perfecto, lineal(Gibson, 1961), lo cual permite que la rigidez y la resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla se obtenga directamente. De un ciclo de carga y descarga se obtiene generalmente la rigidez , que es el doble del módulo al esfuerzo cortante.

La curva presiométrica, cuando se dibuja como presión aplicada contra deformación volumétrica, es lineal y la pendiente es igual a la resistencia al esfuerzo cortante, éste procedimiento es independiente del modelo matemático utilizado para su interpretación. El valor máximo del ensayo es la resistencia requerida para el diseño(Clarke, 1995).



IAME <sup>20</sup>	Material elástico lineal
BISHOP ET AL <sup>21</sup>	Material cohesivo
MENARD <sup>22</sup> VESIC <sup>23</sup>	Material cohesivo friccionante
GIBSON Y ANDRADE <sup>3</sup> WINDLE Y WROTH <sup>24</sup> JEFFERIES <sup>6</sup> HOULSBY Y ROBERTSON <sup>7</sup>	Material elasto - plástico perfecto lineal sin cambios de volumen
DENBY Y CLOUGH <sup>19</sup> FERREIRA Y ROBERTSON <sup>8</sup>	Material perfectamente plástico no lineal sin cambio de volumen
PRÉVOST Y HOEG <sup>25</sup>	Elasto - plástico con endurecimiento por deformación o reblandecimiento sin cambios de volumen
LADANYI <sup>26</sup> VESIC <sup>23</sup> HUGHES ET AL <sup>10</sup> ROBERTSON Y HUGHES <sup>27</sup> HOUSLBY ET AL <sup>28</sup>	Material elasto - plástico perfecto , lineal con cambios de volumen
PALMER <sup>2</sup>	Material cohesivo sin cambios de volumen
MANASSERO <sup>9</sup>	Material no cohesivo con cambio de volumen
ARNOLD <sup>29</sup>	Curva del ensaye presiométrico hiperbólica
SADEEQ Y CLARKE <sup>30</sup>	Curva del ensaye presiométrico parabólica

Tabla 3.1.- Modelos propuestos para interpretar el ensaye presiométrico.

## ENSAYES EN ARENAS.

En los ensayos en arenas se supone que hay drenaje, los cambios de volumen en las arenas ocurren cuando la membrana es expandida. Varios métodos de interpretación están basados en la suposición de ROWE'S, aplicando esfuerzos de dilatación, o sea que el cambio de volumen es función de la deformación al esfuerzo cortante.

Un proceso iterativo para determinar directamente la respuesta esfuerzo - deformación al cortante de un ensaye presiométrico, puede ser independiente del modelo de interpretación utilizado(Manassero, 1977), como ocurre en la interpretación de ensayos en arcillas. El método más utilizado comúnmente, y aplicado exclusivamente en arenas densas, esta basado sobre la suposición de que el radio de deformaciones es constante( Hughes, 1977). Tal es el caso de que la pendiente de la curva esfuerzo efectivo aplicado contra deformación de la cavidad(ambas a escala logarítmica natural), es simplemente una función del ángulo de resistencia al esfuerzo cortante.

Otros métodos de análisis están basados sobre relaciones empírica entre el cambio de volumen en la arena y la expansión de la membrana, esta relaciones fueron desarrolladas en base a ensayos presiométricos realizados en laboratorio, por lo cual son utilizados muy escasamente en la práctica.

El módulo al esfuerzo cortante, es tomado usualmente de un ciclo de carga y descarga, suponiendo que la arena es un material elástico, y que el módulo al esfuerzo cortante varía con los esfuerzos efectivos. Cuando la membrana se expande, los esfuerzos en la arena se incrementan, por tanto el módulo al esfuerzo cortante aumenta.

Contrario a lo que sucede en las arcillas una vez que se alcanza el esfuerzo efectivo que tenía el suelo en el sitio. Como en las arcillas el módulo es no lineal, este varía con el rango de las deformaciones, con esto es posible producir un perfil de la rigidez no lineal.

## ENSAYES EN ROCAS.

La expansión de la membrana en los ensayos presiométricos en rocas está limitada a la capacidad de presión de que se dispone ya que puede ser insuficiente a causa de la dureza de la roca. Los ensayos son analizados suponiendo que la roca es elástica. En la práctica, la roca contiene discontinuidades, consecuentemente la expansión de la membrana es función del manto rocoso, ella puede generar el desarrollo de nuevas fisuras y abrir las discontinuidades ya existentes. El módulo del ciclo de descarga y recarga representa la rigidez de la roca intacta( Johnston, 1990).

Es posible que la resistencia de la roca disminuya durante la expansión de la cavidad, comúnmente se supone que la roca es un material que no presenta cambio de volumen, y el análisis utilizado para las arcillas puede ser utilizado para encontrar la resistencia del esfuerzo cortante. La interpretación del ensaye permite generar la cohesión y el ángulo de fricción interna, sin embargo, esto no es posible sin los datos de otros ensayos.

## FACTORES QUE AFECTAN LA INTERPRETACION.

Las propiedades del suelo o de la roca están en función del estado de esfuerzos in situ, dirección de los esfuerzos durante el ensaye presiométrico, valor de la carga y método de interpretación. En resumen, las propiedades del terreno se ven afectadas por los diversos cambios que ocurren durante el ensaye presiométrico, incluyendo muestreo y preparación de especímenes para ensayos en laboratorio e instalación de la sonda par pruebas in situ. Por estas razones los mejores métodos de diseño están basados en modelos teóricos, pero modificados empíricamente.

Los resultados de un ensaye presiométrico están afectados por el proceso de instalación, condiciones del terreno, y procedimiento de ensaye, como se muestra en la tabla 3.2

Tipo de suelo	Parámetros	Sonda	Método	Referencia	Ecuación
todos los suelos y rocas	$G_{ur}$ , o $G_u$ o $G_r$	todas las sondas	ciclo de carga y descarga		$0.5(dp/d e_c)$
arcillas	$\sigma_h$	PBP	ajuste de curva	Marsland y Randolph <sup>31</sup>	
	$\sigma_h$	SBP	directo de curva		
	$\sigma_h$	FDP	curva descargada	Houlsby y Withers <sup>7</sup>	$p_1 - c_u(1 + \ln \{G/c_u\})$
	$G_{ur}$ , o $G_u$ o $e_u$	Todas las sondas	ciclo carga -descarga	Muir-Wood <sup>4</sup>	$(p_{lm} - s_h) / (5.5 \text{ a } 15)$
	$c_u$	PBP	presión límite modificada	Amar et al <sup>16</sup>	
	$c_u$ $c_u$	SBP FDP	parte posterior de curva cargada curva descargada	Windle y Wroth <sup>24</sup> Houlsby <sup>7</sup>	$(p - s_h) = c_u(1 + \ln(G/c_u) + \ln(V/V))$ $p = p_1 - 2c_u(1 + \ln(\sinh(e_{max} - e) / \sinh(c_u/G)))$
arenas	$s_h$ $s_h$	PBP, FDP SBP	no recomendable directo de curva		
	$G_{ur}$ , o $G_u$ o $e_u$	todas las sondas	ciclo carga - descarga	Bellotti et al <sup>15</sup>	
	$f^*$ $f$	PBP SBP	no recomendable parte post. de la curva cargada	Hughes et al <sup>10</sup>	$p_{lm} = b \cdot 2^{(f^* - 24)/4}$ $\sin f^* = s / (1 + (s-1) \sin f_{cv})$
	$f^*$ $n$	FDP SBP	curva descargada parte post. de curva cargada	Houlsby y Nutt <sup>17</sup> Hughes et al <sup>10</sup>	$(p_1 - s_h) / s_h = 2.21 + 19.35 D_r$ $(q_c - s_h) / (p_1 - s_h) = 3.80 + 9.84 D_r$ $\sin u = s + (s-1) \sin f_{cv}$

Tabla 3.2 Resultados de un ensaye presiométrico.

## INTERPRETACION.

Los ensayos presiométricos pueden ser analizados como la expansión de una cavidad, pero a causa de los factores que se citan en la tabla 3.3 es usual que se apliquen métodos empíricos o modelos simples en la interpretación. Las tres propiedades obtenidas de un ensaye presiométrico: esfuerzos horizontales totales "in situ", rigidez y deformación, son usualmente derivados de la utilización de uno de los métodos que se dan en la tabla 3.4. Los parámetros de diseño: el módulo presiométrico,  $E_m$ , y la presión límite modificada,  $p_{lm}$ , son derivados de un ensaye presiométrico utilizando un procedimiento específico. Para los parámetros de la resistencia al esfuerzo cortante (de ensayes en arcillas) y el ángulo de fricción interna (en arenas) se toma el promedio de los valores de la parte superior de curva expandida, lo que representa la condición máxima que se requiere para los cálculos de estabilidad y capacidad de carga.

La rigidez que se toma de un ciclo de carga y descarga, es un promedio de la secante del módulo al esfuerzo cortante para un cierto rango de deformación (típicamente se toma 0.1 - 0.2 % de la deformación de la cavidad), con este valor se puede predecir el hundimiento o el asentamiento de terreno.

Los vectores de desplazamiento sólo pueden ser estimados utilizando técnicas numéricas, tales como elementos finitos. En estos casos los esfuerzos "in situ" y el perfil de la rigidez se obtienen de un ciclo de carga y descarga.

Usualmente la selección de los parámetros es independiente de las diferentes partes de la curva del ensaye presiométrico. Por ejemplo la rigidez se toma de un ciclo de carga y descarga, mientras que la resistencia es tomada de la parte superior de la curva cargada. Los parámetros son dependientes de la historia geológica, dos métodos han sido desarrollados para tomar en cuenta esta dependencia. El primero selecciona los parámetros y asegura que sean compatibles utilizando un desarrollo sistemático de la teorías de mecánica de suelos y mecánica de rocas, el segundo es conocido como modelado asistido por computadora (CAM) (Clarke, 1993), es un modelo teórico construido con los datos del ensaye, y produce la curva esfuerzo - deformación.

El primer método puede ser sólo aplicado a ensayos realizados con los presiómetro s con perforación previa (PBP) y con los presiómetro s de empuje(FDP), cuando existen condiciones no homogéneas alrededor de la sonda debido a los efectos de la instalación. El primer método es comúnmente aplicado a los ensayos con el Presiómetro auto perforante (SBP), pero el método asistido por computadora (CAM) es visto como una mejor y nueva alternativa.

Los resultados del CAM, a una rutina de curva propia, depende del modelo utilizado. El número mínimo de los parámetros obtenidos son tres ; los esfuerzos "in situ", la rigidez y la resistencia. Se puede realizar una combinación de estos tres parámetros, pero realizando una entrada inteligente en el proceso iterativo, para asegurar que los parámetros obtenidos sean compatibles con cualquier otro.

Parámetro	Arcilla						Arena						Grava	Roca		
	blanda			dura			suelta			densa				suave		maciza
sonda	PBP	SBP	FDP	PBP	SBP	FDP	PBP	SBP	FDP	PBP	SBP	FDP	PBP	PBP	SBP	PBP
$\sigma_h$		A	C,E	C	A	C,E		B			C				C	
$s_u$	B,E	A	B,E	B,E	A	B,E								C,E	B	C,E
$c'$															B	
$\phi'$		B			B		C,E	A	C,E	C,E	A	C,E	C,E		B	
$G_i$		A			A			A			A				B	
$G_{ur}$	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A
$p_l$	B,E	A	B,E	B,E	A	B,E	C,E	A	C,E	C,E	A	C,E	C,E	C,E	B	C,E
$c_h$	B	A	A	B	A	A										

; C, Posible; E, Empírico

$\sigma_h$  Esfuerzo horizontal total A. Excelente; B, Bueno

$s_u$  Resistencia al esfuerzo cortante

$c'$  Cohesión

$\phi'$  Angulo de resistencia al esfuerzo cortante

$G_i$  Módulo inicial al esfuerzo cortante

$G_{ur}$  Módulo secante al esfuerzo cortante en un ciclo de carga y descarga

$p_l$  Presión límite

$c_h$  Coeficiente de consolidación

Parámetros obtenidos de un ensaye presiométrico.

### III.1 ESFUERZO HORIZONTAL TOTAL.

El esfuerzo horizontal total es el esfuerzo geostático “in situ”, su selección es muy subjetiva ya que depende de la identificación de un punto sobre la curva. De allí el número de técnicas que ayudan a identificar este punto basadas en suposiciones que pueden ser invalidadas por el proceso de instalación o por la diferencia entre el modelo propuesto y la respuesta real del terreno.

La figura 3.6 muestra la posición del punto del esfuerzo horizontal sobre tres posibles tipos de curva presiométrica. El esfuerzo horizontal puede ser sólo seleccionado directamente de un ensaye presiométrico con el presiómetro auto perforante (SBP), en donde la alteración es mínima.

La mejor forma de identificar este punto es revisar diferentes ensayes de una perforación. La cual es una función del diseño del transductor, barrenado y esfuerzos “in situ”. Usualmente es posible identificar claramente el esfuerzo horizontal de un ensaye presiométrico superficial y referirse a esta señal del transductor (Clarke, 1993), esto permite identificar el esfuerzo horizontal de todos los otros ensayes (tabla 3.5).

Los esfuerzos horizontales sólo pueden ser obtenidos de los ensayes con el Presiómetro con perforación previa (PBP) y con el Presiómetro de desplazamientos totales (FDP) utilizando el modelo asistido por computadora (CAM). La figura 3.7 muestra los posibles métodos de identificación del valor del esfuerzo horizontal de un ensaye con el presiómetro de auto barrenado (SBP), es razonable que haya ocurrido una alteración significativa.



<i>Operación</i>		<i>Efectos</i>
<i>instalación</i>	<i>perforación previa(PBP)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- reducción de los esfuerzos "in situ"</li> <li>2.- terreno blando adyacente a la sonda</li> <li>3.- erosión de capas blandas</li> <li>4.- perforación no cilíndrico</li> <li>5.- dato de referencia desconocido</li> </ul>
	<i>auto barrenado(SBP)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- un sobre barrenado da una reducción de los esfuerzos "in situ"(cf. perf. previa)</li> <li>2.- la falta de barrenado causa expansión en la cavidad(cf. empuje)</li> <li>3.- esfuerzo cortante entre la sonda y terreno</li> </ul>
	<i>empuje(FDP)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- expansión de la cavidad durante la instalación</li> </ul>
	<i>alineación de sonda(ver- ticalmente)</i> <i>tipo de suelo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- expansión no cilíndrica</li> <li>1.- condiciones de drenaje desconocido</li> </ul>
<i>condiciones del terreno</i>	<i>anisótropo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- expansión no cilíndrica</li> </ul>
	<i>discontinuidades</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- no es continuo</li> </ul>
	<i>variación del tipo de suelo sobre la sección de ensaye.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- los desplazamientos varían a lo largo de la membrana.</li> </ul>
<i>procedimiento</i>	<i>esfuerzos intermedios</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- esfuerzos verticales y no esfuerzos intermedios en suelos preconsolidados</li> </ul>
	<i>largo de membrana</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- fondo restringido tienden hacia una expansión esférica</li> </ul>
	<i>agrietamiento por tensión a profundidades superficiales</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- de discontinuidades</li> </ul>
	<i>agrietamiento por tensión en suelos pre- consolidados</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- de discontinuidades</li> </ul>
	<i>r</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- las propiedades del terreno dependen del valor de la deformación</li> <li>2.- drenado parcial</li> </ul>
	<i>sondas tipo desplazami- ento de volumen</i> <i>sonda tipo desplazami- ento radial</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.- expansión promedio</li> <li>2.- examino la posición de transductores</li> </ul>

Tabla 3.3- Efectos de instalación, tipo de sonda, tipo de terreno y procedimiento de prueba sobre la interpretación del ensaye

Tipo de suelo	Parámetros	Sonda	Método	referencia	ecuación
todos los suelos y rocas	$G_{ur}$ , o $G_u$ o $G_r$	todas las sondas	ciclo de carga y descarga		$0.5(dp/d \epsilon_c)$
arcillas	$\sigma_h$	PBP	ajuste de curva	Marsland y Randolph <sup>31</sup>	$p_1 - c_u(1 + \ln \{G/c_u\})$
	$\sigma_h$	SBP	directo de curva	Houlsby y Withers <sup>7</sup>	
	$\sigma_h$	FDP	curva descargada		
	$G_{ur}$ , o $G_u$ o $\epsilon_u$	Todas las sondas	ciclo carga -descarga	Muir-Wood <sup>4</sup>	$(p_{lm} - \sigma_h) / (5.5 \text{ a } 15)$
	$c_u$	PBP	presión limite modificada	Amar et al <sup>16</sup>	$(p - \sigma_h) = c_u(1 + \ln(G/c_u) + \ln(V/V_0))$
	$c_u$ $c_u$	SBP FDP	parte posterior de curva cargada curva descargada	Windle y Wroth <sup>24</sup> Houlsby <sup>7</sup>	$p = p_1 - 2c_u(1 + \ln(\sinh(\epsilon_{max} - \epsilon) / \sinh(c_u/G)))$
arenas	$\sigma_h$	PBP, FDP	no recomendable	Bellotti et al <sup>15</sup>	$p_{lm} = b \cdot 2^{(\phi' - 24)/4}$ $\sin \phi' = s / (1 + (s-1) \sin \phi'_{cv})$ $(p_1 - \sigma_h) / \sigma'_{v1} = 2.21 + 19.35 D_r$ $(q_c - \sigma_h) / (p_1 - \sigma_h) = 3.80 + 9.84 D_r$ $\sin \nu = s + (s-1) \sin \phi'_{cv}$
	$\sigma_h$	SBP	directo de curva		
	$G_{ur}$ , o $G_u$ o $\epsilon_u$	todas las sondas	ciclo carga - descarga		
	$\phi'$	PBP	no recomendable	Hughes et al <sup>10</sup>	
	$\phi$	SBP	parte superior de la curva cargada	Houlsby y Nutt <sup>17</sup>	
	$\phi'$ $\nu$	FDP SBP	curva descargada parte superior de curva cargada	Hughes et al <sup>10</sup>	

tabla 3.4, Métodos utilizados comúnmente para interpretar los ensayos presiométricos

$(\sigma_h - \sigma_v) < 2c_u$	para todas las arcillas
$\sigma_h > u_o \sigma$	para todos los suelos
$c_u / \sigma_h' > 0.3$	(basado sobre la relación de Skempton's para arcillas normalmente consolidadas)
$\sigma_h' / \sigma_v' > (1 - \sin \phi') / (1 + \sin \phi')$	para arenas
$K_a < \sigma_h' / \sigma_v' < K_p$	para todos los suelos.

tabla 3.5 Ejemplos de limites para seleccionar los valores del esfuerzo horizontal<sup>1</sup>

Es imposible obtener el esfuerzo horizontal “in situ” utilizando un instrumento de intrusión o un aparato de muestreo, ya que deben considerarse los cambios de los esfuerzos “in situ” durante la instalación. Se debe tener cuidado en la instalación pero en especial en el instrumento de intrusión, para permitir reducir la alteración o que sea lo mínima posible, y permita realizar una distribución del esfuerzo horizontal en forma uniforme. El Presiómetro auto perforante (SBP) es un aparato de ensaye de intrusión “in situ”. diseñado para lograr una mínima alteración en el terreno antes del ensaye presiométrico.

El esfuerzo actuante sobre la sonda debe ser igual al esfuerzo “in situ”, de esta forma el esfuerzo principal es el esfuerzo cortante entre el terreno y la sonda (Clarke, 1984).

La selección del esfuerzo horizontal de una curva de un ensaye con el presiómetro auto-perforante (SBP) es subjetivo, debido a que la respuesta del terreno es en función de los esfuerzos “in situ”; por eso los resultados de un ensaye pueden ser utilizados basándose en teorías de mecánica de rocas y suelos, determinando la cualidad de los valores seleccionados

“in situ”. Alternativamente se pueden hacer comparaciones con los resultados de la interpretación de otros ensayos presiométricos o de la historia geológica.

El primer Presiómetro auto perforante (SBP) fue desarrollado para ensayos sobre arcillas blandas, donde los esfuerzos “in situ” son generalmente conocidos. La figura 2.8 muestra los resultados de un número de mediciones del esfuerzo horizontal comparado con un perfil predeterminado de pruebas triaxiales con ensayos con el presiómetro auto perforante. Los ensayos del presiómetro auto perforante (SBP) mostrados fueron realizados en arcillas preconsolidadas cerca de la superficie y normalmente consolidada en la zona mas profunda. Los valores que se dan en estas pruebas se derivan de utilizar fórmulas empíricas.

El Presiómetro auto perforante (SBP) ha sido utilizado extensivamente en arcillas, pero puede operar en roca suave y en roca fracturada.

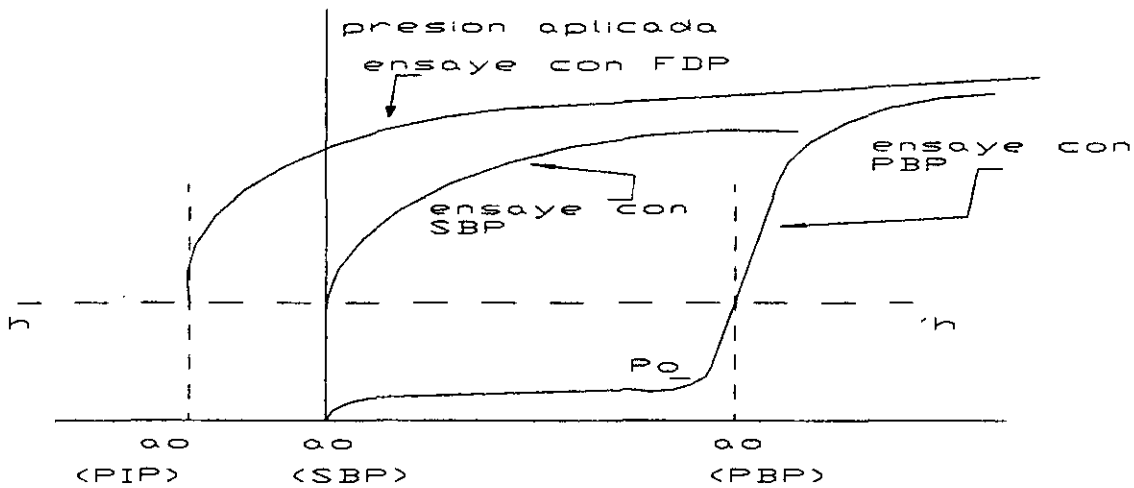


fig. 3.6 La definición del dato de referencia para los tres tipos de ensayo presiométrico

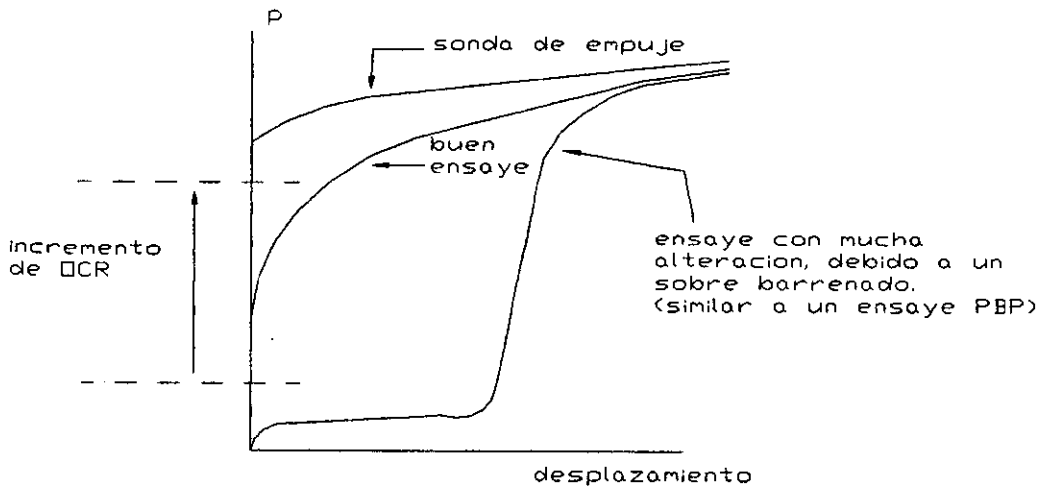


fig. 3.7.- Guía para la selección de límites del esfuerzo horizontal en los ensayos con SBP

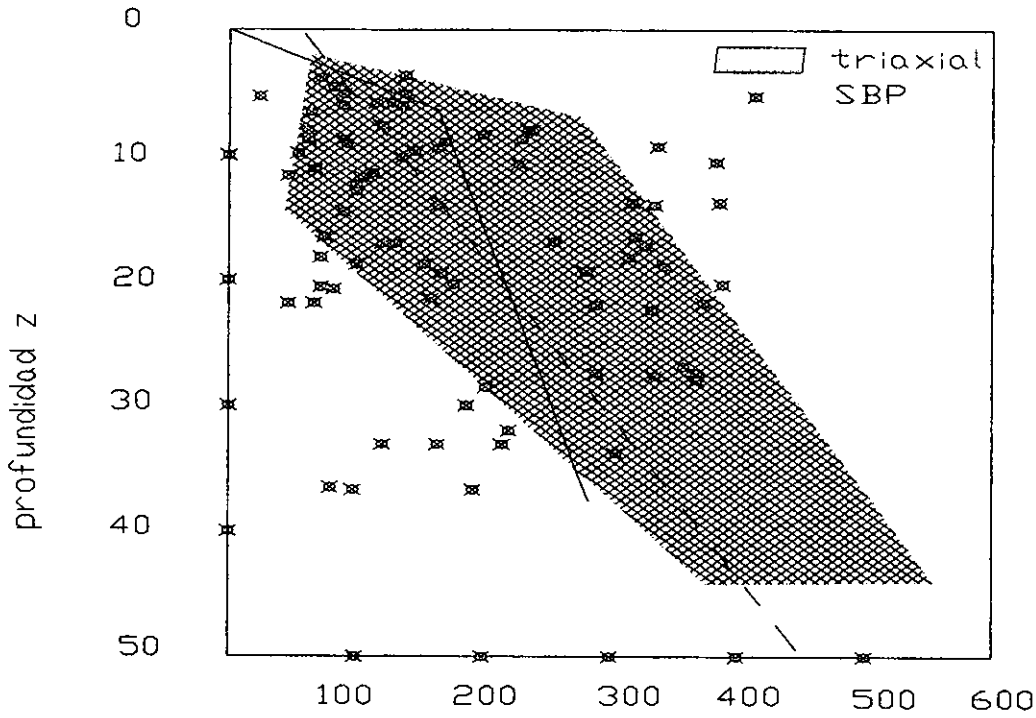


fig. 3.8 Comparación entre pruebas triaxiales y ensayos con el presiómetro autopercutor

### III.2 MÓDULO DEL ESFUERZO CORTANTE

El ensaye presiométrico es una prueba ideal para poder medir la resistencia del suelo in situ, el módulo al esfuerzo cortante es independiente de las condiciones de drenaje.

Además originalmente fue utilizado para medir la resistencia en las rocas (Frank, 1991), y más recientemente ha sido utilizado para medir la resistencia en todos los suelos y rocas.

La porción de la curva presiométrica cargada es una función de la alteración provocada por la instalación, por eso la pendiente de la curva representa la resistencia de un suelo alterado. Por esta razón la resistencia es siempre tomada de un ciclo de carga y descarga, como se muestra en la fig. 3.9 (a), que representa el comportamiento elástico. Un promedio de la resistencia se obtiene de la línea formada por todos los datos del ciclo. La pendiente de esta línea es aproximadamente dos veces el módulo al esfuerzo cortante. Este módulo es la secante de la resistencia que representa el promedio de la resistencia de los elementos de suelo alrededor de la sonda y a los esfuerzos efectivos en el punto de descarga. Este módulo puede ser obtenido de un ciclo de carga y descarga utilizando varios tipos de presiómetros en diferentes suelos.

El rango de deformación que se genera de un ciclo de carga y descarga en el laboratorio no es el mismo que el obtenido en el sitio, por lo que el módulo será distinto. Un valor más realista puede ser obtenido seleccionando un rango de deformaciones esperado para el terreno. Es recomendable que el rango de deformación de una cavidad esté entre el 0.1% y el 0.2%. La pendiente es calculada de la porción del ciclo de descarga utilizando la máxima deformación de la cavidad como un origen, o de la porción de recarga utilizando la mínima deformación de la cavidad. Con la porción de recarga se obtienen resultados más consistentes (Amar, ISSMFE).

Es posible obtener un perfil de la resistencia simplemente tomando la secante de la curva utilizando la deformación máxima y mínima de la cavidad de un ciclo de carga y descarga como un origen, produciendo una variación promedio de la resistencia con la deformación de la cavidad. (fig. 3.9 (b)). Para ensayos en arcillas dicho promedio puede ser

convertido a un valor de resistencia directamente comparable al medido en una prueba triaxial<sup>4</sup>. Generalmente, el perfil obtenido de ensayos en arcillas duras es similar al obtenido en pruebas triaxiales si el módulo es normalizado a los esfuerzos efectivos "in situ", o a la presión de consolidación.

Un valor simple del módulo al esfuerzo cortante o una variación del módulo con la deformación puede ser derivado de un ensaye presiométrico..

El módulo no se afecta por las condiciones de drenaje, puede ser convertido a módulo de elasticidad drenado o no drenado. La instalación de un presiómetro afecta el terreno adyacente a la perforación. Por eso, la pendiente inicial de un ensaye presiométrico es en función de las propiedades del terreno alterado por el proceso de instalación. Teóricamente, la pendiente inicial de un ensaye con presiómetro auto - perforante (SBP) representa la resistencia de un suelo alterado durante la instalación, en la práctica la alteración puede ser pequeña (menor de 0.2 % de la deformación de la cavidad), aun así se afecta la pendiente inicial.

En arcillas , los esfuerzos efectivos durante la prueba son prácticamente constantes y el módulo al esfuerzo cortante representa la resistencia in situ del terreno. Este no es el caso de las arenas donde el esfuerzo efectivo se incrementa a medida que la membrana se expande.

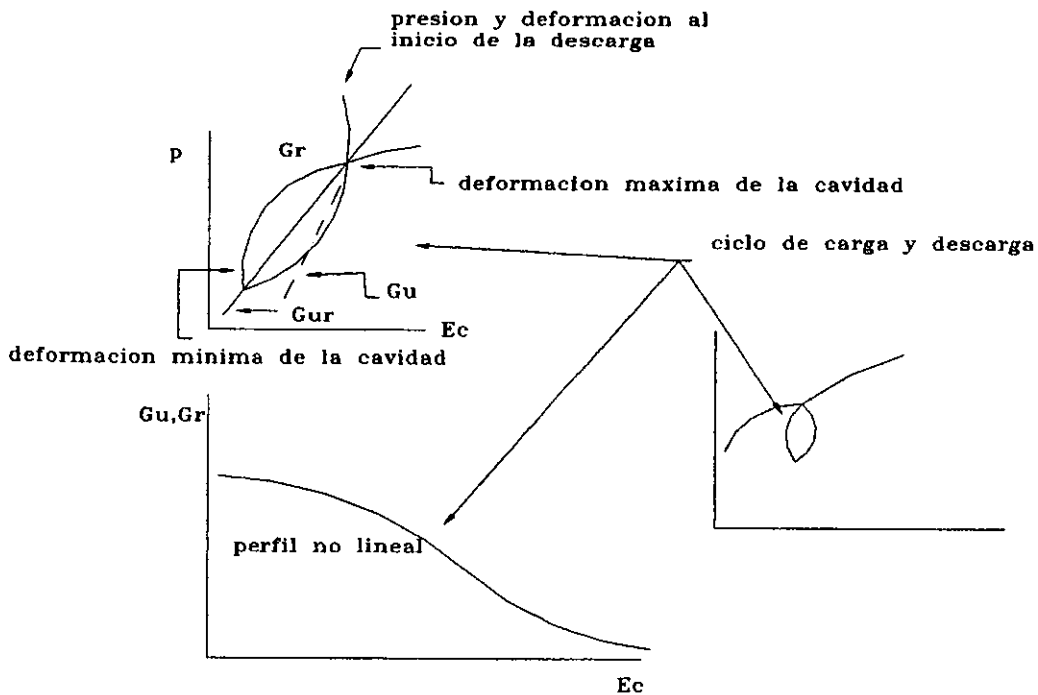


Fig. 3.9.- La selección del módulo al esfuerzo cortante de un ciclo de recarga y descarga.

- a).- El módulo secante en un ciclo de carga y descarga
- b).- Perfil no lineal

$G_{ur}$  = Módulo secante de un ciclo;  $G_u$  = Módulo secante descargado medido de la máxima deformación de la cavidad en el ciclo;  $G_u$  = Módulo secante descargado medido (deformación máxima -0.1%);  $G_{r0}$  = Módulo secante de recarga de una deformación de cavidad mínima en el ciclo.



### III.3 RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA

La resistencia no drenada en el pico y después de éste puede ser obtenida de un ensaye con el presiómetro auto perforante en arcillas, aunque la máxima resistencia es sensible a cualquier alteración y es usualmente ignorada. Por lo que la resistencia obtenida con el presiómetro debe limitarse a cálculos de estabilidad que esta basada en una resistencia post-pico, obtenida ésta de la parte posterior de la curva cargada suponiendo que se sujeta a un modelo perfectamente plástico, como se muestra en a fig. 3.10

También es posible derivar la resistencia de un ensaye presiométrico de perforación previa(SBP), pero la expansión debe ser lo suficiente segura para no afectar la arcilla por la instalación. Además, el dato de referencia debe ser correctamente identificado. Es mas usual obtener una resistencia no drenada por una correlación empírica como se muestra en la fig. 3.11, donde  $p_{tm}$  es la presión requerida para poder expandir hasta el doble el tamaño de la cavidad inicial.

La resistencia no drenada puede obtenerse de una curva de descarga de un ensaye presiométrico utilizando un modelo adecuado. Un caso particular es el de la curva de descarga del presiómetro de desplazamientos totales o de empuje(FDP), donde el inicio teóricamente es la presión límite, esta interpretada como el valor requerido para producir una expansión infinita. La pendiente de la curva presiométrica, es dos veces la resistencia no drenada(Meyerhof, 1987).

La resistencia al esfuerzo cortante es rutinariamente obtenida de ensayes presiométricos en arcillas. Esta prueba se realiza exclusivamente para determinar la resistencia de las arcillas, generalmente la resistencia no drenada obtenida de un ensaye con el presiómetro auto perforante(SBP) en arcillas duras es similar a la que se obtiene de una prueba triaxial sobre la misma arcilla, como se muestra en la fig. 3.13 y en arcillas blandas, dicha resistencia presiométrica resulta mayor que la obtenida en una prueba triaxial sobre la misma arcilla

blanda. Los datos mostrados en la fig 3.13 son tomados de un gran número de sitios, por lo que es normal tener una alta desviación estándar, por la dependencia del método de interpretación y del rango de deformación manejado. Todos los métodos de interpretación dan una resistencia aproximadamente igual, si se analiza la parte superior de la curva (Seed,1986) y por esta razón es recomendable utilizar un modelo simple, para interpretar la parte superior de la curva del ensaye.

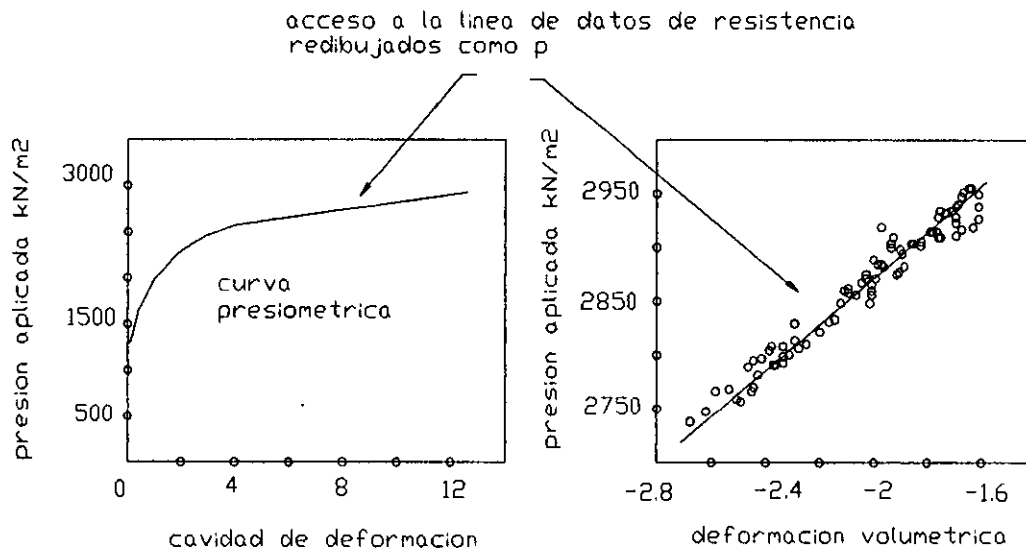


Fig., 3.10 Cálculo de la resistencia no drenada a partir de un ensaye presiométrico en arcillas suponiendo que ésta es un material elásto - plástico perfecto, lineal.

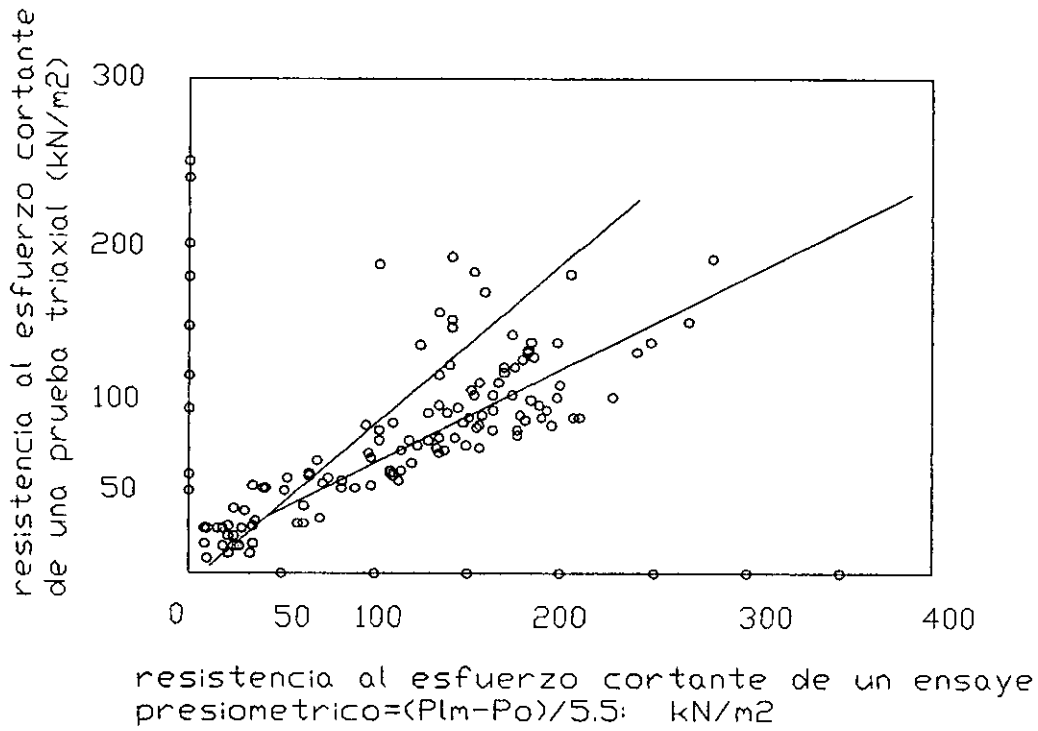


Fig. 3.11.- Correlación entre la presión límite y resistencia al corte no drenada de un ensaye con perforación previa (PBP) en arcilla.

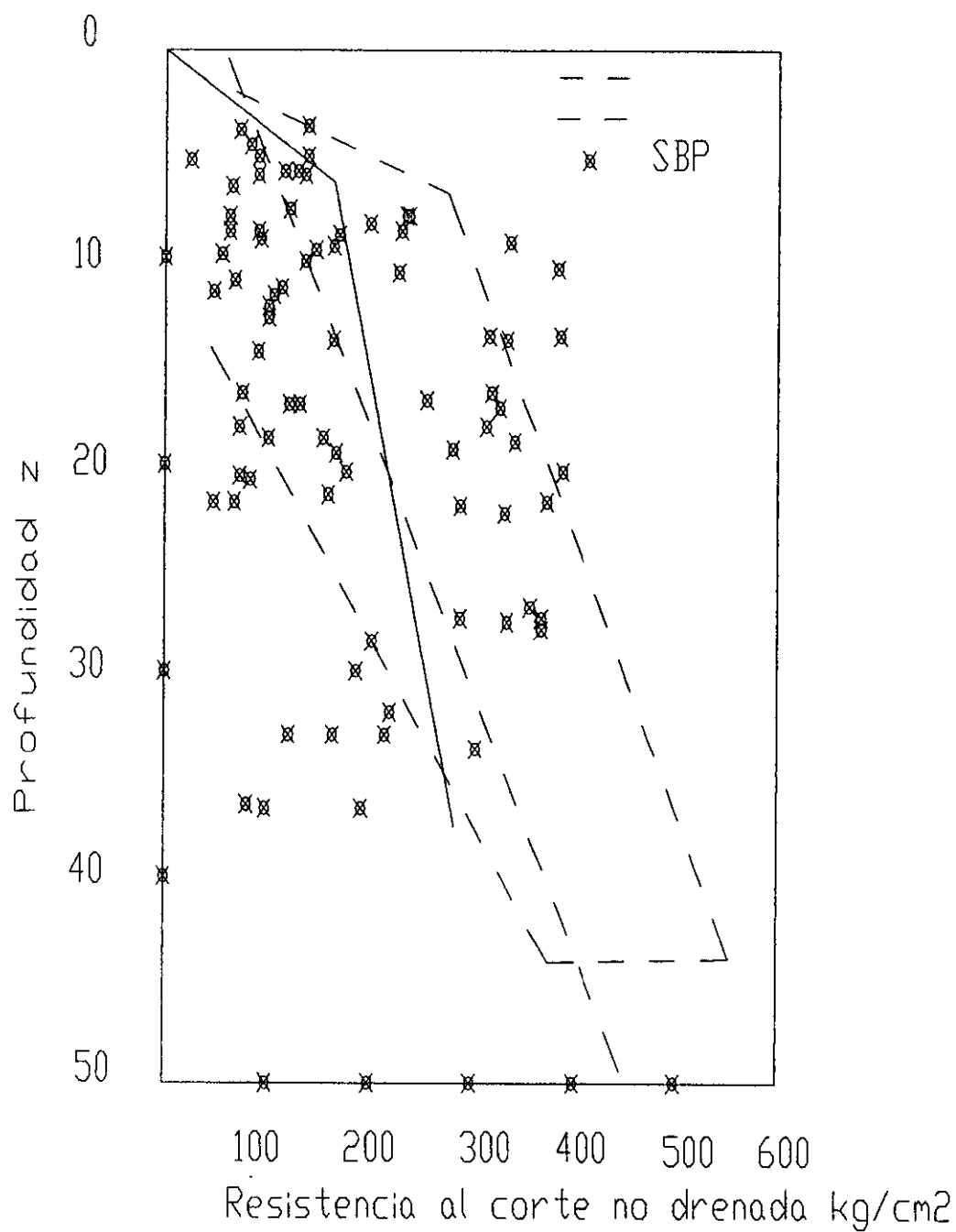


Fig. 3.13.- Comparación entre la resistencia al corte no drenada en arcillas obtenida de ensayos con presiómetro s auto perforantes (SBP) y pruebas triaxiales

### III.4 ANGULO DE FRICCION INTERNA

Son utilizadas correlaciones empíricas para evaluar el ángulo de fricción interna de los ensayos realizados con el presiómetro con perforación previa (PBP) y con el presiómetro de empuje (FDP). Los resultados no son muy consistentes por lo que deben ser manejados con precaución.

La interpretación de un ensaye realizado con el presiómetro auto perforante(SBP) en arenas produce una gran dispersión en el perfil del ángulo de fricción interna con la profundidad, requiriéndose una cuidadosa elección del dato de referencia, por lo que sólo los datos de ensayos confiables pueden ser utilizados para generar tales correlaciones.

El ángulo de fricción interna puede ser obtenido de la parte superior de la curva cargada de un ensaye con un presiómetro auto perforante(SBP) <sup>10</sup>. El ángulo máximo es sensible a la elección del dato de referencia. La pendiente,  $s$ , de la línea esta relacionada con el ángulo de fricción interna como se puede observar en la tabla 3.2 y el ángulo de fricción interna a volumen constante, se adopta normalmente de  $35^\circ$ . Este método es solo aplicable en arenas densas.

No es posible obtener el ángulo de fricción interna de un ensaye presiométrico con perforación previa (PBP) y de un presiómetro de empuje (FDP) debido a la alteración ocasionada durante la instalación.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

### III.5 PARAMETROS PRESIOMÉTRICOS MENARD.

La presión leída durante el ensaye en el CPV ( $p_m$ ) debe ser corregida de acuerdo a la siguiente expresión, par obtener la presión neta ( $p_c$ ) transmitida al suelo:

$$p_c = p_m - p_1 + \gamma_w h$$

donde:

$p_1$  presión necesaria para deformar el sistema de carga (en particular las membranas y el tubo ranurado) obtenida mediante la curva de calibración (fig. 3.14)

$\gamma_w$  peso volumétrico del agua

$h$  profundidad a la que se ejecuta el ensaye.

Las mediciones realizadas durante el ensaye se presentan finalmente en la curva presiométrica clásica para el volumen inyectado al final de cada incremento de presión (fig. 3.15)

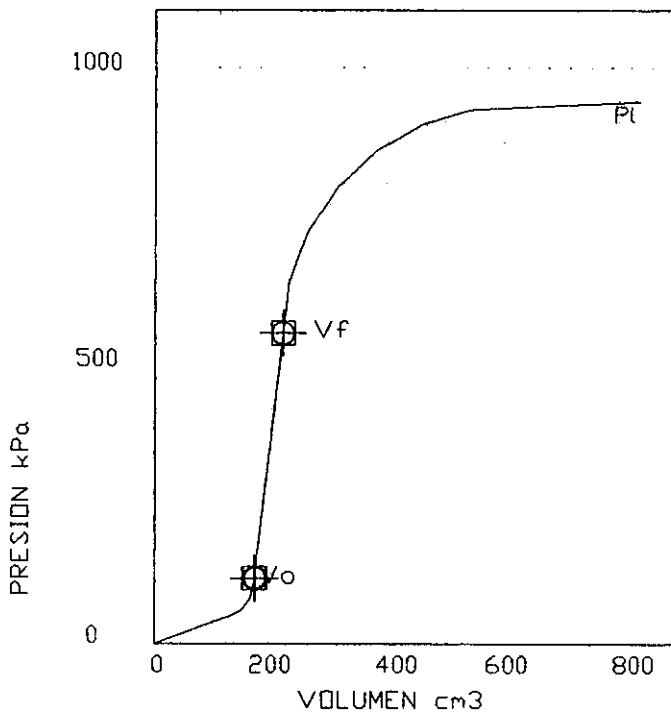


Figura 3.15 . Resultados de un ensaye presiométrico clásico

En la curva presiométrica que se muestra en la figura 2.15, se pueden identificar los parámetros presiométricos clásicos (García, 1988):

$E_m$  = módulo presiométrico.

$P_f$  = presión de fluencia

$P_l$  = presión límite o de ruptura

a) Módulo presiométrico  $E_m$

Es el parámetro que caracteriza la fase pseudo - elástica de la curva presiométrica, representando rigurosamente un módulo de rigidez al corte del suelo.

En efecto, planteando el equilibrio de fuerzas de un elemento contenido en las paredes de un cilindro de radio interno  $r_0$  y espesor infinito (fig. 3.16) se obtiene (Casan, 1978):

$$\sigma_r = (P - P_0)(r_0^2 / r^2) + P_0 \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = - (P - P_0)(r_0^2 / r) + P_0 \quad (3)$$

$$\sigma_z = P_0 \quad (4)$$

donde:

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  esfuerzo radial, tangencial, vertical respectivamente

$p$  presión uniforme

$p_0$  esfuerzo horizontal total en el terreno, en estado de reposo (por simplicidad se supone una variación lineal)

$r_0$  radio interno del cilindro (paredes de la perforación).

$r$  distancia del centro del cilindro al elemento considerado.



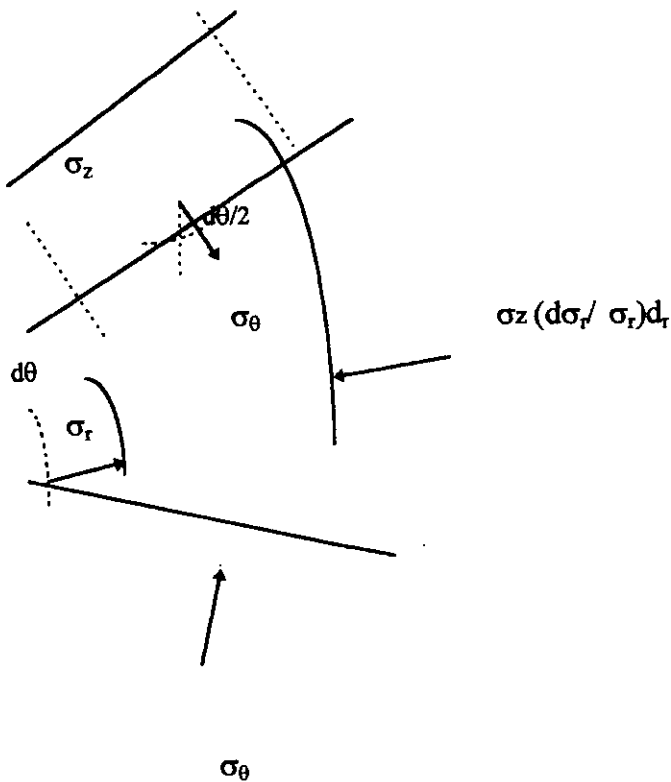


fig 3.16. Equilibrio de una corona cilíndrica alrededor de la sonda presiométrica.

La condición de frontera para  $r = a$  es:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = P_0 \quad (5)$$

El estado de esfuerzos alrededor del presiómetro, representado por las ecuaciones 1 a 3, resulta de la superposición de un estado desviador puro definido por los componentes principales siguientes:

$$\sigma_r' = (p - p_0)(r_0^2 / r^2); \quad \sigma_\theta' = -(p - p_0)(r_0^2 / r); \quad \sigma_z' = 0 \quad (6)$$

sobre las paredes de la perforación, se tiene:

$$\sigma_r' = p - p_0; \quad \sigma_\theta' = -(p - p_0); \quad \sigma_z' = 0 \quad (7)$$

y existe en primera aproximación un estado de deformación plana.

Con respecto al estado inicial de deformación caracterizado por  $P_0$  y aplicando la ley de Hooke, se obtiene:

$$\epsilon_o = \frac{u}{r} = -\frac{(1+\nu)}{E} \{ (1-\nu)(\sigma_\theta' - \nu \sigma_r') \} \quad (8)$$

sustituyendo el valor de  $\sigma_\theta'$ ,  $\sigma_r'$ , en la expresión anterior, la deformación de la pared de la perforación es entonces:

$$u = (1+\nu)/E * (p-p_o) (r_o^2/r) \dots \dots \dots (9)$$

Considerando que la celda de medición guarda una forma cilíndrica durante todo el proceso de carga, el aumento de presión en dicha celda  $dp$  corresponde a un aumento del volumen inyectado  $dv$ , de tal forma que

$$dv = \frac{2(1+\nu)}{E} * (a_0 + \nu) dp \quad (10)$$

donde:

$E$  módulo de deformación.

$\nu$  relación de Poisson.

$a_0$  volumen inicial de la sonda

La ecuación 10 permite calcular  $E_m$ , mediante:

$$E_m = 2(1+\nu) (a_0 + \nu) dp/dv \quad (11)$$

sustituyendo en la expresión anterior el volumen  $V_m$  correspondiente al valor medio de la zona de comportamiento pseudo-elástico de la curva presiométrica, se obtiene finalmente el módulo de deformación siguiente (fig. 3.15)

$$E_m = 2(1+\nu) (a_0 + v_m) dp/dv$$

donde:

$$dp = p_f - p_{om}$$

$$dv = v_f - v_{om}$$

$$v = (v_f + v_{om})/2$$

Por otra parte como  $E$  y  $\nu$  son desconocidos, pero es posible obtener valores razonables de  $\nu$  y de  $E$ . Por ejemplo, en arcillas saturadas donde el contenido de agua no cambia durante toda la prueba, se tiene una relación de Poisson de  $\nu=0.5$ . En suelos parcialmente saturados y suelos escasamente drenados o completamente drenados durante la prueba se tienen valores menores de  $\nu$ . Por estas razones el Centre d'Etudes Menard (1967) propuso un valor constante de  $\nu$  para todo tipo de suelo. El valor propuesto por Menard (Baguelin 1978) es de 0.33, y el resultado del módulo de deformación es llamado módulo Menard  $E_m$ , por lo que :

$$E_m = 2(1+\nu) (a_0 + v_m) dp/dv$$

$$E_m = 2(1+0.33) (a_0 + v_m) dp/dv$$

en la práctica:

$$dp = p_f - p_{om}$$

$$dv = v_f - v_o$$

$$V_m = V_c + (v_f + v_o)/2$$

entonces.

$$E_m = 2.66 [V_c + (v_f + v_o)/2] \{ (p_f - p_{om}) / (v_f - v_o) \}.$$

donde :

$V_c$ : volumen cuando la lectura del volumetro se estabiliza en cero.

$v_f$  : volumen fluencia

$v_o$  : volumen inicial

$p_f$  : presión de fluencia

$p_{om}$  : presión inicial

### PRESION DE FLUENCIA $p_f$

Al representar la evolución de las deformaciones con el tiempo para cada uno de los incrementos de presión, se obtiene la fluencia del materia. Cambefort(1964) fue el primero en proponer esta representación.

Durante el proceso de carga del suelo la presión  $p$  se mantiene constante y se registra la correspondiente variación de volumen que ocurre durante un periodo determinado, siendo para el ensaye estándar igual a 60 segundos.

Considérese el incremento de volumen  $= V_n - V_1$  correspondiente a cada valor de  $p$ , donde  $V_n$  es el volumen registrado al final del periodo a presión constante y  $V_1$  el volumen a la mitad de dicho periodo. Si se traza la curva de fluencia incremento de  $V=f(p)$  se tiene que al inicio del ensaye el incremento de  $V$  decrece cuando  $p$  aumenta, hasta el contacto de la sonda con el suelo; en seguida el incremento pasa por un mínimo y comienza a crecer es entonces cuando empieza efectivamente el ensaye. Podemos constatar que la variación es prácticamente lineal, pero con una pendiente generalmente pequeña..

Cabe remarcar que la duración de cada incremento de presión es de 60 segundos, puede resultar pequeña para poner en evidencia el fenómeno de fluencia en suelos arcillosos; sin embargo , si la duración de los incrementos de presión alcanzara varios minutos e incluso

horas, dicho fenómeno aparecería con mayor claridad y podría ser analizado según se indica en los párrafos anteriores (García , 1988).

La presión  $p$  correspondiente a el punto  $(p_f, v_f)$  al final de la pendiente fuerte de la curva presiométrica es llamada presión de fluencia , la cual es utilizada para calcular el módulo presiométrico  $E_m$ . Si se dificulta la localización exacta del punto  $(p_f, v_f)$  , muchos ingenieros dibujan otra curva de fluencia de ayuda. Se dibujan las lecturas del cambio de volumen que ocurre entre las lecturas a 30 seg y un minuto contra la presión para un mismo intervalo, como se muestra en la fig. 3.17. La presión de fluencia  $p_f$  es localizada en la intersección de las dos tangentes B y C, y la presión de inicio  $p_{om}$  se localiza en la intersección de las tangentes A y B.

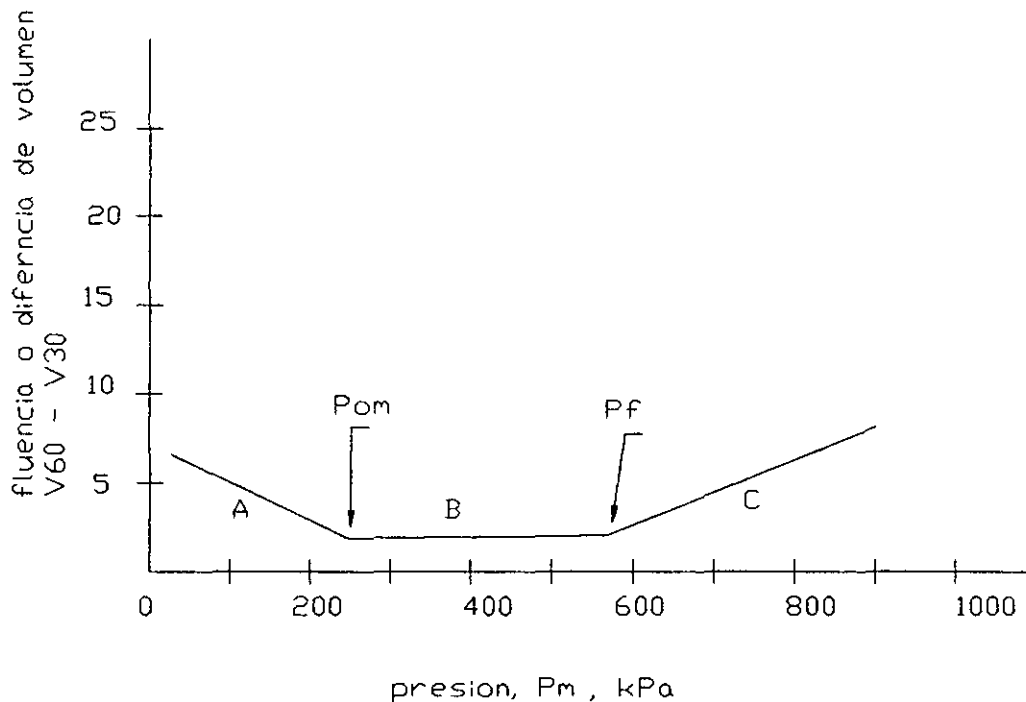


Fig. 3.17 Curva de fluencia.

## LA PRESION LIMITE O DE RUPTURA $P_L$

Refiriéndose a la figura 3.17 durante esta porción del ensaye representado sobre la curva de 0 a  $v_o$ , se supone que la sonda inflada en contacto con las paredes de la perforación empuja al suelo a su posición original, posición que tenia antes de realizar la perforación, la presión limite es alcanzada cuando el suelo falle o que el volumen inyectado  $v$ , corresponda al doble del volumen inicial de la cavidad cilíndrica perforada  $V_c$ , es decir  $2v_o+V_c$ .

Estadísticamente se ha observado que la relación presión límite / presión de fluencia varia entre 1.2 y 2.1 , por lo que se aconseja 1.83 como el valor promedio, además se recomienda también que la relación presión limite/ presión de fluencia no sea mayor a 2.0.

Además se puede calcular con la sig. expresión:

$$p_l = \frac{A}{B} + \frac{1}{A(V_s + 2V_o)}$$

donde:

$$A = \frac{(n \sum p y - \sum p \sum y)}{(n \sum p^2 - (\sum p)^2)}$$

$$B = \frac{(\sum p^2 \sum y - \sum p y \sum p)}{(n \sum p^2 - (\sum p)^2)}$$

$$y = 1/V$$

$p$  = presión corregida

$V_s$  = volumen de corrección de la sonda.

$V_o$  = volumen inicial de la fase elástica

## USO DE LOS RESULTADOS PARA DISEÑO DE CIMENTACIONES.

Tomando como base los resultados de los ensayos presiométricos, se han desarrollados reglas de diseño semi - empíricas basadas en consideraciones teóricas y en observaciones del comportamiento de cimentaciones. A continuación se presentan los criterios básicos propuestos por Menard en 1963 para cimentaciones superficiales.

### Capacidad de carga bajo cargas verticales.

Para cualquier tipo de cimentación cargada verticalmente, la capacidad de carga  $q_u$  se encuentra relacionada con la presión límite  $p_1$  a partir de la expresión:

$$q_u - \sigma_v = k_p (p_1 - p_o)$$

donde :

$\sigma_v$  : presión vertical al nivel de desplante de la cimentación después de su construcción.

$k_p$  : factor de capacidad de carga, función de la profundidad de desplante de la cimentación, de su geometría y del tipo de terreno

$p_o$  : esfuerzo horizontal al nivel del ensaye

Para la obtención de esta expresión Menard (1963) relacionó la resistencia de punta de la cimentación con la presión límite obtenida durante la expansión de una cavidad esférica, comparando esta última con la obtenida durante la expansión de una cavidad cilíndrica. La teoría elastoplástica aplicada involucra el concepto de profundidad crítica, de tal forma que la presión límite (esférica y cilíndrica) aumenta hasta dicha profundidad, permaneciendo constante por debajo de esta si el suelo es homogéneo. La expresión se modifica si se cuenta con cargas inclinadas, cerca de una excavación o de una pendiente.

## CIMENTACIONES SUPERFICIALES

Los valores de  $k$  a considerar en la expresión anterior, se presentan en la tabla 3.7. Cabe señalar que éstos no han sido modificados respecto a los propuestos por Menard en 1963, siendo verificados recientemente (Amar, 1991) mediante pruebas en cimentaciones a escala natural.

Cuando la cimentación está apoyada sobre estratos con resistencia variable en función de la profundidad, se define una presión equivalente  $p_{le}$ , como el promedio geométrico de los valores de la presión límite, medidos a partir del nivel de desplante hasta  $1.5 B$ , siendo  $B$ , el ancho de la cimentación.

Es posible obtener el asentamiento vertical de una cimentación superficial tomando como base que el ensaye presiométrico proporciona un módulo de rigidez al cortante, directamente asociable con la componente desviadora del tensor de esfuerzos (Menard y Rousseau 1962), y considerando que la componente esférica se relaciona con el módulo odométrico  $E_{oed}$  y el módulo Menard  $E_m$  a partir de la expresión siguiente:

$$E_{oed} = \frac{E_m}{\alpha}$$

donde

$\alpha$  : Coeficiente de estructura, de acuerdo con Menard et al (1962), varía entre 0.25 y 1.

Tomando en cuenta como base los parámetros presiométricos clásicos, Menard propuso evaluar el asentamiento de una cimentación rígida  $w$ , mediante la expresión siguiente:

$$w = w_d + w_s$$

donde

$w_d$  : asentamiento debido a al componente desviadora del tensor de esfuerzos

$w_s$  : asentamiento debido a la componente esférica del tensor de esfuerzos



tal que:

$$w_d = \left( \frac{2}{9} \right) * q * B_0 (\lambda_d (B / B_0))^\alpha$$

$$w_s = \left( \frac{\alpha}{4.5} \right) (q \lambda_s B)$$

donde:

$E_d$  : módulo correspondiente a la zona donde domina la componente desviadora del tensor esfuerzos

$q$  : presión media o equivalente aplicada por el cimiento

$B_0$  : ancho de referencia igual a 0.6

$\lambda_d, \lambda_s$  : coeficientes de forma en función de la relación entre la longitud y el ancho de cimiento( tabla 3.9)

$E_d$  : promedio armónico de los valores presiométricos medidos bajo el cimiento hasta una profundidad igual a su semiancho  $R > 30$  cm.

$\alpha$  : coeficiente de estructura en función del tipo de terreno y de la relación  $E/p_1$  (tabla 3,8)

Tipo de suelo	$P_{lm}$ , MPa	$k_p$
arcilla y sedimentos	< 0.7	$0.8(1+0.25(0.6+0.4 B/L) D_c/B)$
	1.2 - 2.0	$0.8(1+0.35(0.6+0.4 B/L) D_c/B)$
	> 2.5	$0.8(1+0.50(0.6+0.4 B/L) D_c/B)$
arena y grava	< 0.5	$(1+0.35(0.6+0.4 B/L) D_c/B)$
	1.0 - 2.0	$(1+0.50(0.6+0.4 B/L) D_c/B)$
	> 2.5	$(1+0.8(0.6+0.4 B/L) D_c/B)$
tiza o yeso		$1.3(1+0.27(0.6+0.4 B/L) D_c/B)$
marga y roca intemperizada		$(1+0.27(0.6+0.4 B/L) D_c/B)$

B ancho, L largo de la cimentación y  $D_c$  es la profundidad de la cimentación

Tabla 3.7. Factor de compacidad  $k_p$  para cimentaciones superficiales

Tipo de suelo			arcilla		silice		arena		arena y grava	
	$E_m/p_1$	$\alpha$	$E_m/p_1$	$\alpha$	$E_m/p_1$	$\alpha$	$E_m/p_1$	$\alpha$	$E_m/p_1$	$\alpha$
pre-consolidados	---	----	>16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3
normalmente consolidados	---	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
suelos o remoldeados	----	----	7-9	1/2	---	1/2	----	1/3	---	1/4

Tabla 3.8 Factor para varios tipos de suelo.

$L/B$	circulo	cuadrado	2	3	5	20
$\lambda_d$	1	1.12	1.53	1.78	2.14	2.65
$\lambda_s$	1	1.10	1.2	1.30	1.40	1.50

Tabla 3.9 Factores de forma  $\lambda_d$  y  $\lambda_s$  para cimentaciones

## **CAPITULO IV**

### **DISEÑO GEOTECNICO DE UNA CIMENTACION SUPERFICIAL , UTILIZANDO LA PRUEBA MENARD.**

- IV.1.- Características del proyecto .**
- IV.2.- Pruebas de campo.**
- IV.3.- Curva presiométrica .**
- IV.4.- Perfil presiométrico.**
- IV.5.- Capacidad de carga.**
- IV.6.- Deformaciones.**

#### IV.- CARACTERISTICAS DEL PROYECTO.

Se pretende construir una cisterna y tanque elevado para almacenar agua, ubicado en el conjunto habitacional Miriapolis en el puerto de Tampico Tamaulipas.

Para la elaboración de este ejemplo nos fue proporcionado el proyecto arquitectónico y los elementos mecánicos transmitidos a la cimentación .

Se describe el objetivo, la ejecución de los trabajos de campo y laboratorio, el perfil estratigráfico detectado en la zona en estudio, el sistema de cimentación recomendado, así como las recomendaciones básicas para llevar a cabo el diseño geotécnico de la cimentación.

##### Descripción del sitio.

El conjunto habitacional MIRIAPOLIS se encuentra en la proximidad de la playa, por lo que aparecen suelos arenosos y dunas en la superficie del sitio.

El tanque se construirá en el sitio que ocupa en la actualidad una glorieta localizada hacia la entrada del conjunto habitacional.

Para fines de diseño sísmico( Manual de la CFE, 1993), se deberá considerar que se encuentra en la zona A.

##### Descripción de proyecto.

En las figuras se muestra la vista en planta y corte de la estructura. Se aprecia que la cisterna tendrá una base cuadrada con ancho igual a 17.85 m ( medidos a ejes), que estará construida por nueve celdas y el tanque elevado tendrá una capacidad de 200 m<sup>3</sup>.

la cisterna tendrá una altura de 4.15 m , con una capacidad de 1000 m<sup>3</sup> ( en la condición final de 9 celdas), y tendrá un desplante a 1.0 m por debajo del nivel del terreno actual.

Los elementos mecánicos transmitidos a la cimentación , correspondientes al tanque elevado lleno y cisterna vacía son:

Peso de la estructura. $W_e$	505.97 T
Peso de la cimentación $W_c$	231.27 T
Peso total, $W_t$	737.24 T. .
Momento de volteo en el desplante de la estructura debido al sismo.	425.28 T-m

Se considera además que la cisterna llena habrá de transmitir una presión adicional de 3.65 T / m<sup>2</sup>.

Objetivo.

El objetivo principal del informe es definir el sistema de cimentación más adecuado para la estructura y realizar la revisión geotécnica correspondiente incluyendo la capacidad de carga admisible de sistema suelo - cimentación y los asentamientos de la misma ante las cargas de servicio.

El alcance del estudio incluye además los puntos indicados a continuación:

- 1.- Presentar los perfiles y cortes estratigráficos.
- 2.- Presentar las recomendaciones para el diseño de la cimentación recomendada.

Información geotécnica disponible.

Se contó con parte de un estudio previamente ejecutado, sobre la base de un sondeo de penetración estándar a 5.4 m de profundidad.

En dicho trabajo se concluye que el subsuelo está constituido por arena de grano pequeño con un ligero contenido de finos arcillosos entre 0 y 1.8 m.

De acuerdo con los resultados de la prueba de penetración estándar se definen los estratos siguientes.:

Estrato	Profundidad	N(SPT)	Descripción
1	0.0 a 1.2	9 a 13	Arena de compacidad baja
2	1.2 a 4.2	16 a 28	Arena de compacidad media
3	4.2 a 4.8	6	Arena de compacidad baja
4	4.8 a 5.4	55	Arena de compacidad alta

Se tiene el nivel de agua superficial a una profundidad de 2.0 m.

Con base a toda esta información, se consideran dos alternativas de solución para la cimentación las cuales son:

a).- Zapatas corridas desplantadas a 1.2 m de profundidad rigidizadas por contratraves. La capacidad de carga admisible recomendada varia entre 4 y 6.6 T/m<sup>2</sup> para un ancho variable de

1.0 a 4.0 m, con asentamientos de magnitud despreciable. Se recomendó limitar el ancho de la cimentación a máximo de 2.0 m.

b).- Losa de cimentación desplantada superficialmente, mejorando la compacidad de los suelos superficiales en un espesor de 1.2 m. Se recomienda calcular la capacidad de carga admisible como  $q_a = 0.8 (B)$ , B en metros y  $q_a$  en  $T/m^2$

#### IV.2 PRUEBAS DE CAMPO

Se realizaron dos ensayos presiometricos en los sitios que se indican en la fig 4.1 , los datos obtenidos de éstos son los siguientes.

DATOS DE CALIBRACION DE LA SONDA. CAL. 001				
	m	b	1/m	b/m
$0 < V < 281 \text{ CM}^3$	374	0	2.67 E-03	0.00E+00
$282 < V < 650$	671	-205	1.49E-03	-3.06E-01

## ENSAYE PRESIOMÉTRICO SP-1

3 m

4 m

1 2 3 4 5 6 1 2 3 4 5 6

PRES	VOL	VOL	p <sub>c</sub>	DV	VOL	PRES	VOL	VOL	p <sub>c</sub>	DV	VOL
	30seg	60seg			60seg		30seg	60seg			60seg
bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
0.4	35	55	0.553	20	55	0.45	45	60	0.7	15	60
0.9	95	136	0.836	41	136	0.6	80	102	0.7	22	102
1.35	185	237	1.016	52	237	0.8	125	155	0.8	30	155
1.75	295	350	1.223	55	350	1.25	190	235	1	45	235
2.1	420	490	1.364	70	490	1.5	280	325	1.1	45	325
						1.6	365	400	1.1	35	400
						1.75	435	470	1.1	35	470
						2.25	515	550	1.5	35	550



7m

0.5	57	74	0.9	17	74	0.75	50	78	1.241	28	78
0.6	87	98	0.9	11	98	1.1	94	97	1.541	3	97
0.8	110	118	1.1	8	118	1.5	103	104	1.922	1	104
1.35	130	136	1.6	6	136	2	112	112	2.401	0	112
1.5	140	143	1.7	3	143	2.75	122	124	3.118	2	124
1.85	148	152	2	4	152	3.6	134	136	3.936	2	136
2.4	157	160	2.6	3	160	4.15	147	147	4.457	0	147
2.75	164	164	2.9	0	164	5.5	165	167	5.753	2	167
3.5	172	173	3.6	1	173	6.7	185	187	6.9	2	187
4.5	187	189	4.6	2	189	8.1	210	214	8.228	4	214
6.1	210	212	6.1	2	212	10.6	254	262	10.6	8	262
7.8	238	244	7.7	6	244	13.75	322	332	13.65	10	332
9.8	280	289	9.7	9	289	15.5	370	380	15.33	10	380
11.6	320	330	11	10	330						
13	360	375	13	15	375						

8 m

11 m

PRES	VOL	VOL	p <sub>c</sub>	DV	VOL	PRES	VOL	VOL	p <sub>c</sub>	DV	VOL
	30seg	60seg			60seg		30seg	60seg			60seg
bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
1.2	72	76	1.8	4	76	0.75	92	125	1.5	33	125
2.4	84	85	2.97	1	85	1.9	190	205	2.5	15	205
3.4	92	92	3.95	0	92	2.6	220	225	3.1	5	225
4	97	97	4.54	0	97	3.5	245	250	3.9	5	250
5	102	102	5.53	0	102	4.25	265	267	4.6	2	267
6.2	110	110	6.71	0	110	5.25	300	304	5.6	4	304
7.25	117	117	7.74	0	117	5.8	326	331	6.1	5	331
9.25	132	132	9.7	0	132	6.6	358	367	6.8	9	367
12.3	155	156	12.6	1	156	7.25	395	405	7.4	10	405
14.5	174	180	14.8	6	180	8.0	430	440	8.1	10	440
17.5	207	211	17.7	4	211	8.75	480	490	8.8	10	490
20	230	235	20.2	5	235						

12m

13 m

0.35	42	45	0.23	3	45	0.9	77	115	1.89	38	115
1.75	107	132	1.397	25	132	2.5	152	157	3.38	5	157
2.35	147	154	1.938	7	154	4	178	182	4.81	4	182
4.75	170	170	4.295	0	170	4.8	196	196	5.58	0	196
5.85	180	180	5.369	0	180	5.65	210	210	6.39	0	210
7.9	200	200	7.365	0	200	7	235	235	7.67	0	235
9.1	226	230	8.485	4	230	8.75	270	272	9.32	2	272
10.75	262	272	10.02	10	272	10.85	315	327	11.4	12	327
12.25	320	340	11.44	20	340	13	391	425	13.4	34	425
14.1	400	440	13.14	40	440						
15.25	495	530	14.15	35	530						

SE DESMONTA EL CASQUILLO DE LA SONDA A LOS 14 m.

Notas

- 1.- Presión registrada en el manómetro
- 2.- Lectura del volumen a los 30 segundos
- 3.- Lectura de volumen registrada a los 60 segundos
- 4.- Presión corregida tomando en cuenta los datos de calibración de la sonda.

donde  $p_c$  = Presión en el manómetro - Presión de inercia + presión de la columna de agua

Presión de inercia  $=v/m-b/m$  , estos datos se toman de los datos de calibración de la sonda

- 5.- Diferencia de volúmenes( vol. 60 - vol. 30)
- 6.- Volumen registrado a los 60 segundos

## ENSAYE PRESIOMÉTRICO SP-2

2 m

3 m

	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
PRES	VOL	VOL	p <sub>c</sub>	DV	VOL	VOL	PRES	VOL	VOL	p <sub>c</sub>	DV	VOL
	30seg	60seg			60seg			30 seg	60seg			60seg
bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
0.4	30	58	0.445	28	58	0.4	50	100	0.4	50	100	100
0.75	87	118	0.634	31	118	0.8	162	235	0.5	73	235	235
1.6	146	152	1.394	6	152	1	300	360	0.5	60	360	360
1.8	160	162	1.567	2	162	1.25	420	465	0.6	45	465	465
2.2	170	172	1.94	2	172	1.75	530	580	0.9	50	580	580
2.5	182	182	2.213	0	182							
3.1	196	197	2.773	1	197							
3.4	205	207	3.047	2	207							
4	224	225	3.598	1	225							
4.8	248	251	4.329	3	251							
5.5	268	272	4.973	4	272							
6.25	292	297	5.702	5	297							
6.85	317	327	6.257	10	327							
7.75	350	358	7.111	8	358							
9.25	410	425	8.511	15	425							
9.75	460	470	8.944	10	470							

5 m

7 m

0.6	20	67	0.9	47	67	0.35	45	60	0.89	15	60
0.9	102	136	1	34	136	1	91	105	1.41 9	14	105
1.5	175	200	1.5	25	200	1.5	114	116	1.89	2	116
1.9	216	226	1.8	10	226	1.9	124	126	2.26 3	2	126
2.5	246	252	2.3	6	252	2.75	140	140	3.07 6	0	140
3.25	277	285	3	8	285	3.7	157	158	3.97 8	1	158
4.35	325	335	4	10	335	4.9	180	184	5.10 8	4	184
5.25	372	385	4.9	13	385	6.2	204	206	6.34 9	2	206
6	420	440	5.5	20	440	7.8	236	240	7.85 8	4	240
						10.25	284	290	10.2 1	6	290
						12.6	330	340	12.4 9	10	340

8.5 m

10.5m

PRES	VOL	VOL	p <sub>c</sub>	DV	VOL	PRES	VOL	VOL	p <sub>c</sub>	DV	VOL
	30seg	60seg			60seg		30seg	60seg			60seg
bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	bar	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
1.4	67	72	2.06	5	72	0.5	50	70	1.4	20	70
2.6	92	94	3.2	2	94	1.25	111	130	2	19	130
4	114	114	4.55	0	114	1.7	141	142	2.4	1	142
5.85	142	145	6.31	3	145	2.1	156	162	2.7	6	162
8.25	177	180	8.62	3	180	2.75	178	185	3.3	7	185
11.25	225	228	11.5	3	228	3.25	197	200	3.7	3	200
14.25	285	292	14.4	7	292	3.5	212	215	3.9	3	215
16.25	342	410	16.2	68	410	4.25	250	255	4.6	5	255
						6.35	332	353	6.6	21	353
						7.25	400	415	7.4	15	415
						8.1	460	480	8.1	20	480

12m

14 m

1	68	90	0.759	22	90	1.2	100	122	2.27	22	122
1.9	110	110	1.606	0	110	2.8	157	162	3.77	5	162
2.85	124	137	2.484	13	137	4.25	188	190	5.14	2	190
4	142	142	3.62	0	142	6.2	233	235	6.97	2	235
5.1	160	160	4.672	0	160	8.5	270	295	9.15	25	295
6.7	181	184	6.208	3	184	11.25	380	392	11.8	12	392
8.6	215	217	8.02	2	217	14.5	490	540	14.8	50	540
10.75	258	268	10.03	10	268						
13.25	330	357	12.41	27	357						
14.6	408	450	13.62	42	450						

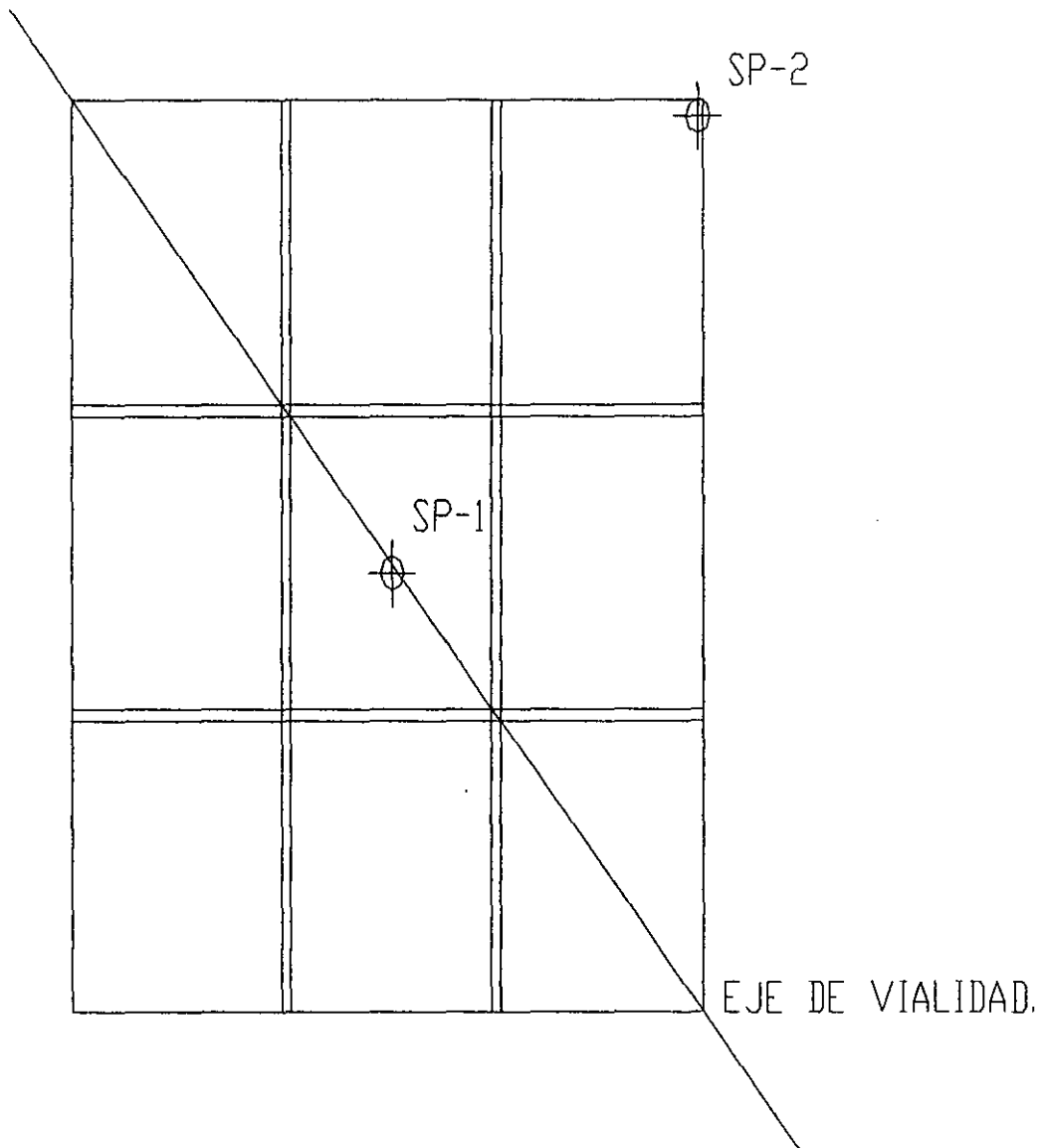
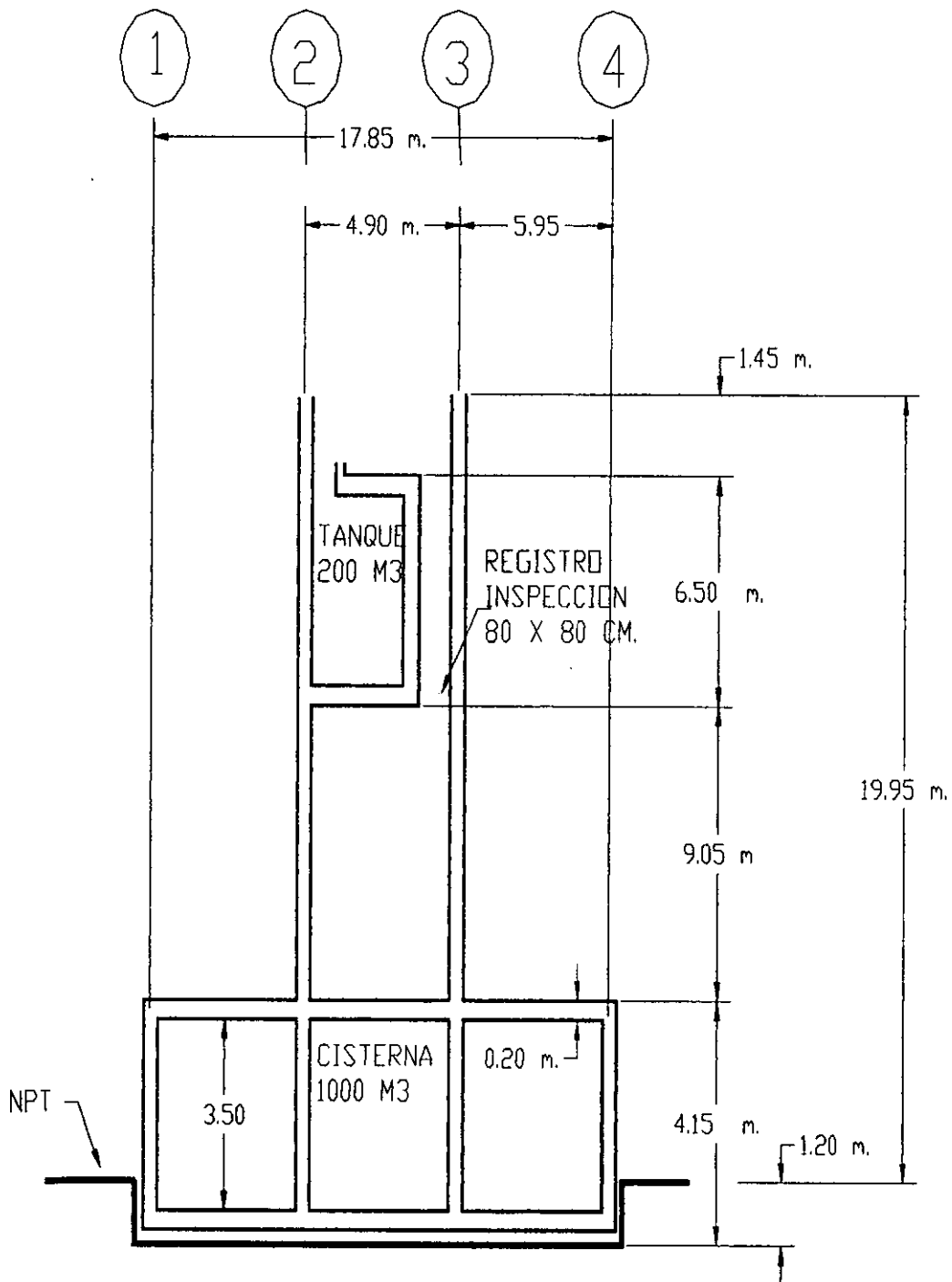
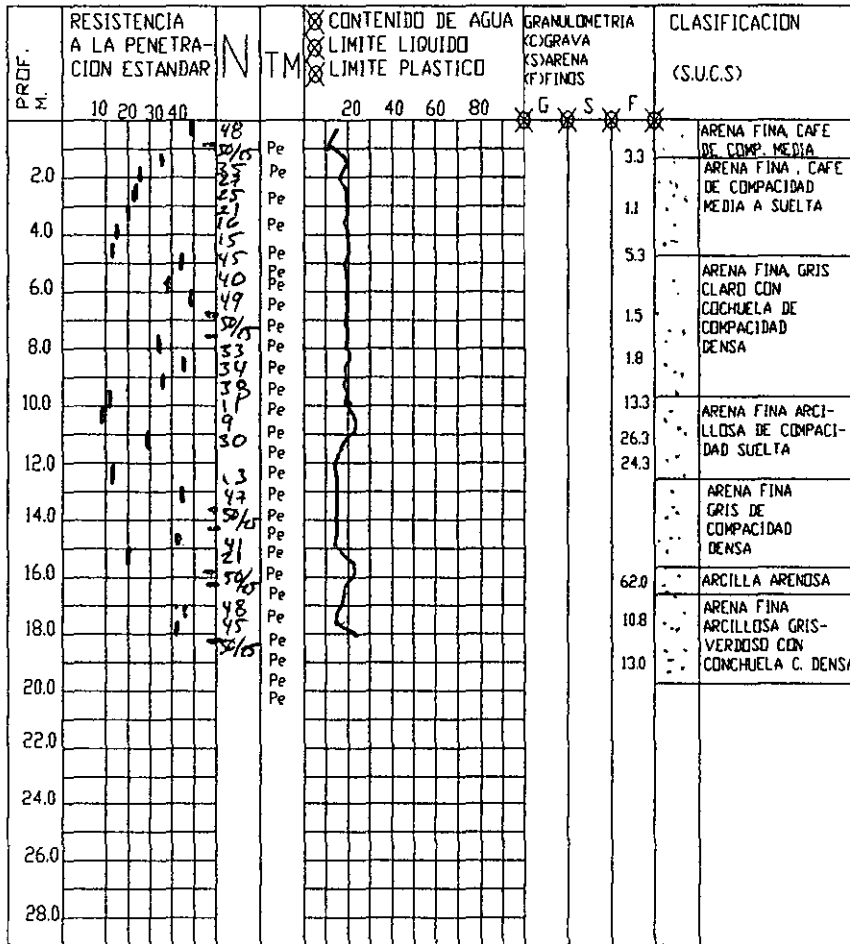


figura 4.1 CROQUIS DE LOCALIZACIÓN DE SONDEOS



ALZADO DEL TANQUE CISTERNA





SIMBOLOGIA



N NUMERO DE GOLPES PARA PENETRAR 30 CM.

50/X 50 GOLPES PARA PENETRAR X CM.

MAYOR DE 50 GOLPES AVANCE CON BROCA TRICONICA

PH PESO DE HERRAMIENTA

NR NO SE RECUPERO MUESTRA

Po PENETRACION ESTANDAR

BD BARRIL DENISON

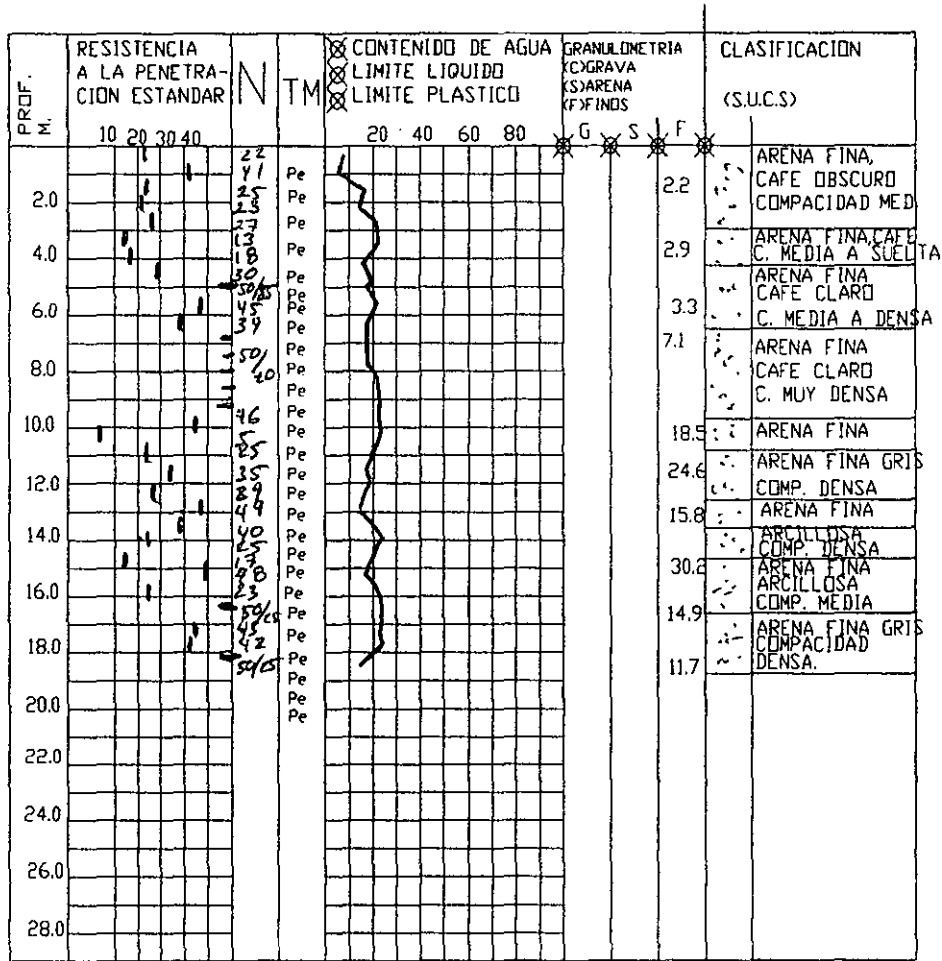
NT NIVEL DEL TERRENO

NAF NIVEL DE AGUAS FREATICAS

Sh TUBO SHELBY

TANQUE ELEVADO MIRIAPOLIS  
PERFIL ESTRATIGRAFICO SP-1

NAF 1.3 M



SIMBOLOGIA



N NUMERO DE GOLPES PARA PENETRAR 30 CM.

50/X 50 GOLPES PARA PENETRAR X CM.

MAYOR DE 50 GOLPES AVANCE CON BROCA TRICONICA

PH PESO DE HERRAMIENTA

NR NO SE RECUPERO MUESTRA

Po PENETRACION ESTANDAR

BD BARRIL DENISON

NT NIVEL DEL TERRENDO

NAF NIVEL DE AGUAS FREATICAS

Sh TUBO SHELBY

### IV.3 CURVAS PRESIOMETRICAS

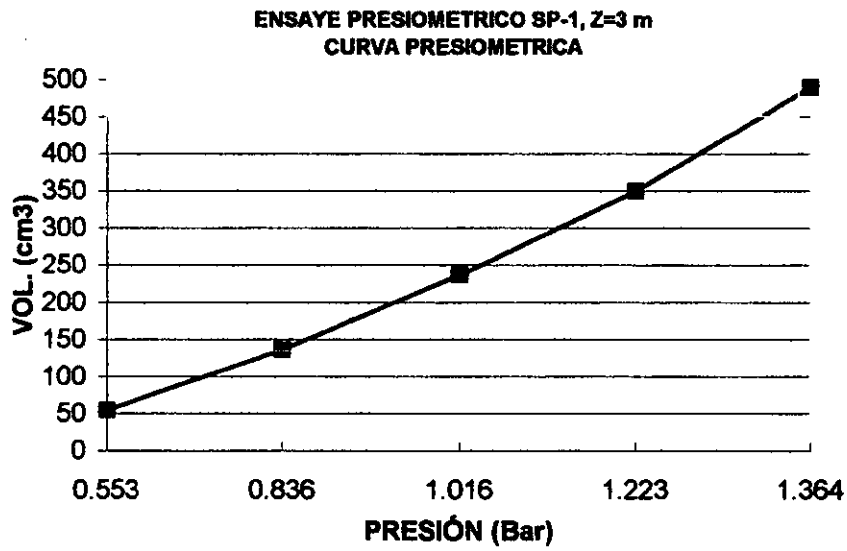


FIGURA 4.4

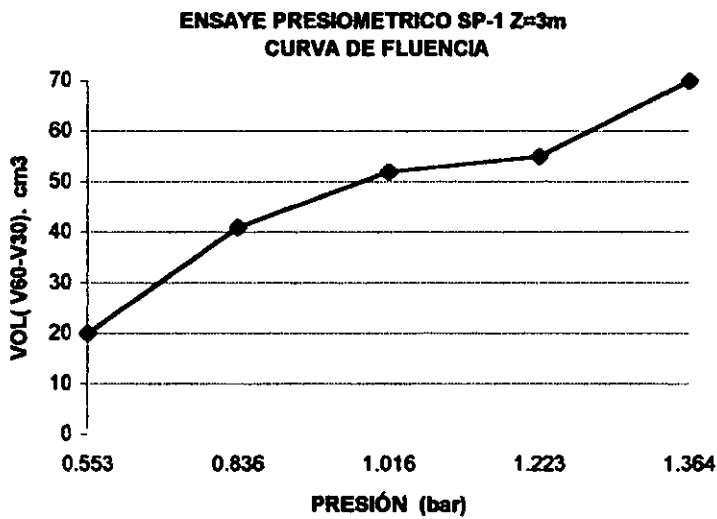


FIGURA 4.5

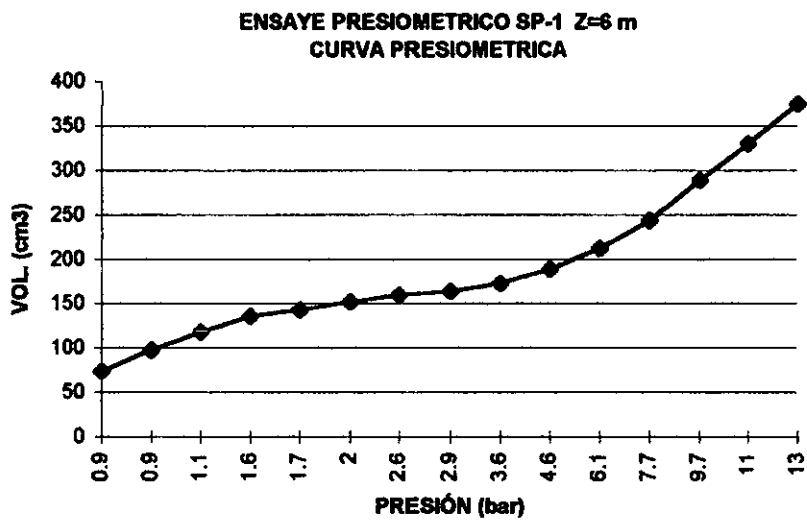


FIGURA 4.6

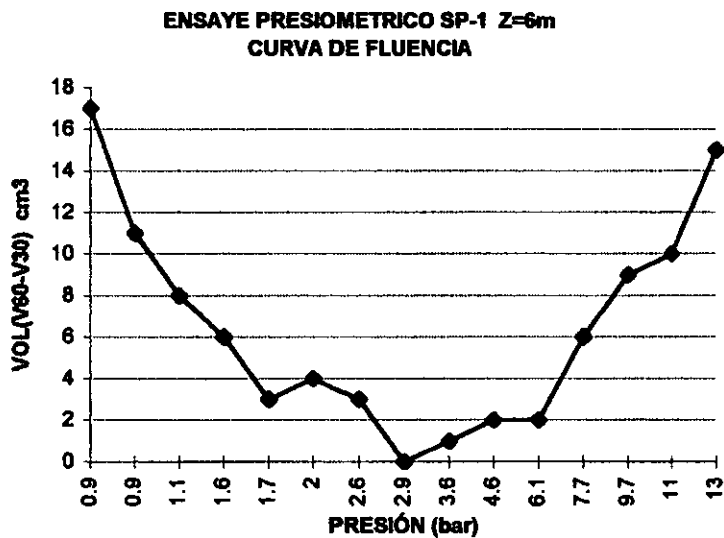


FIGURA 4.7

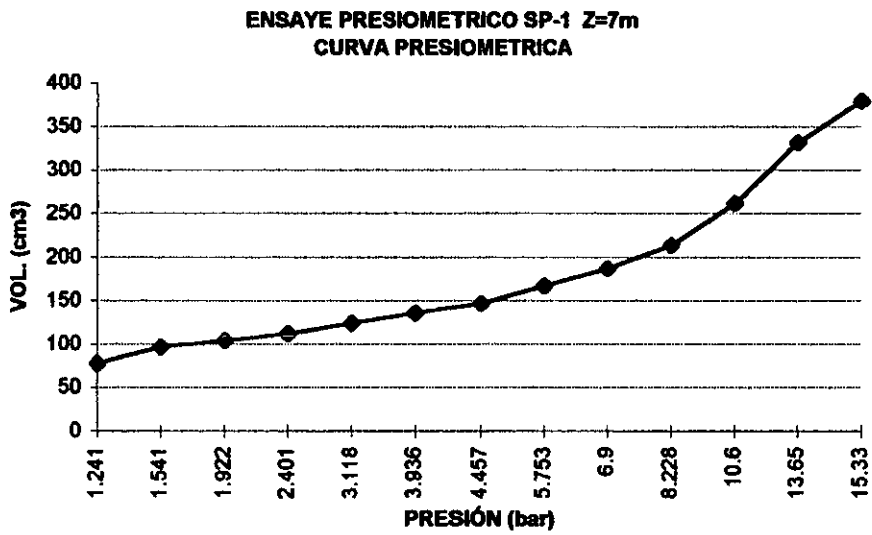


FIGURA 4.8

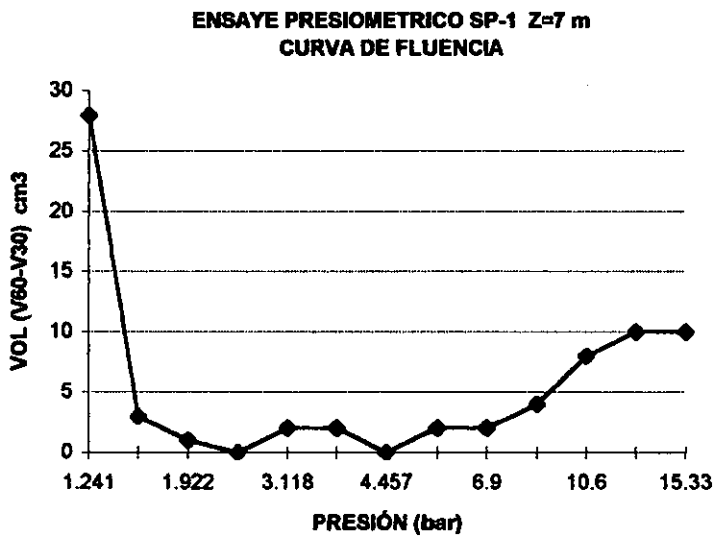


FIGURA 4.9

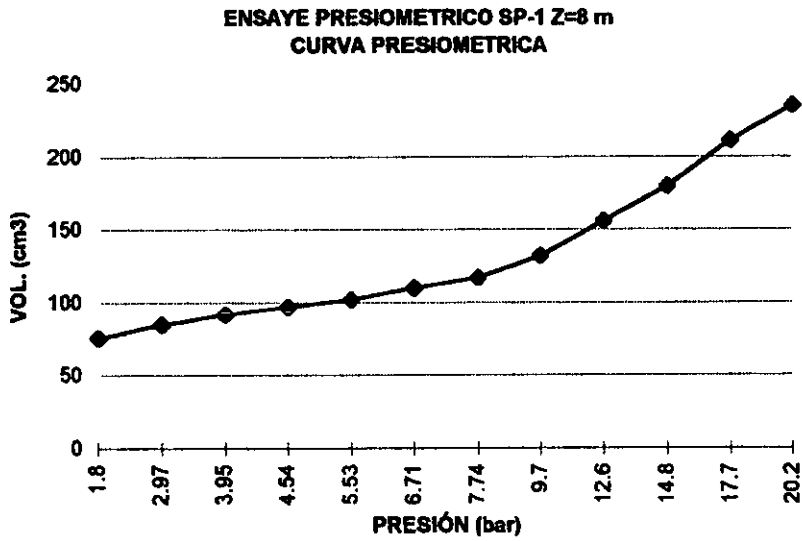


FIGURA 4.10

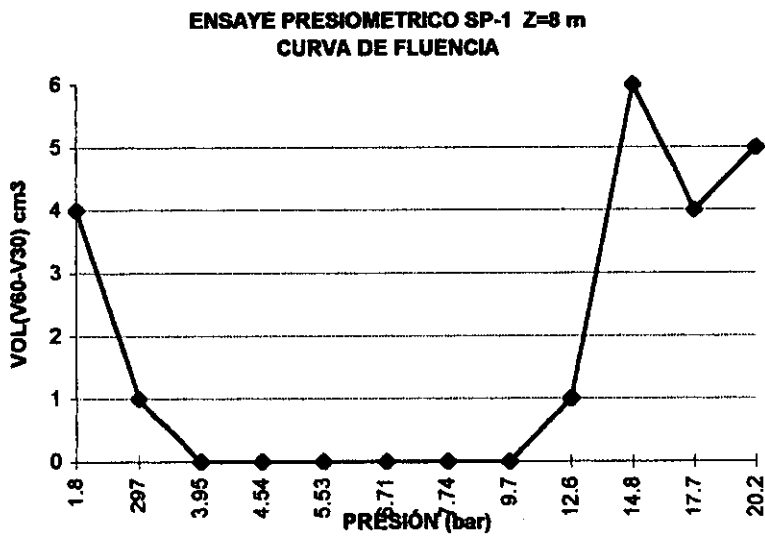


FIGURA 4.11

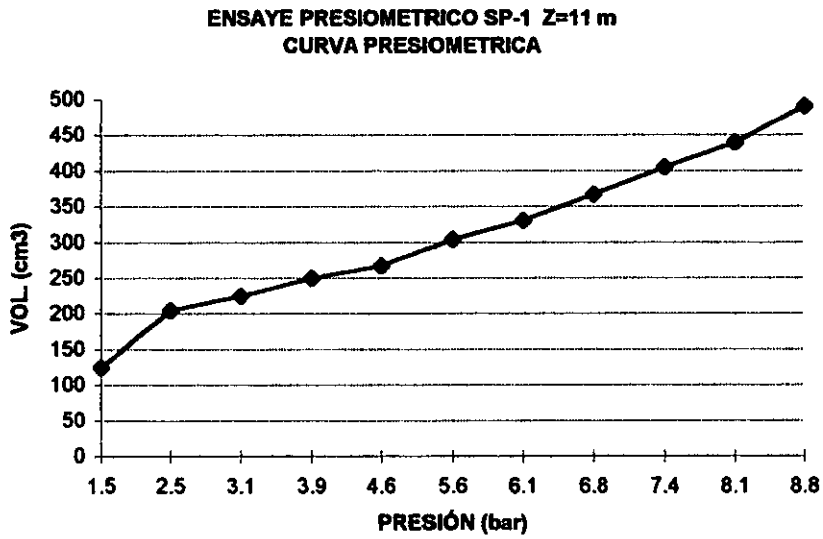


FIGURA 4.12

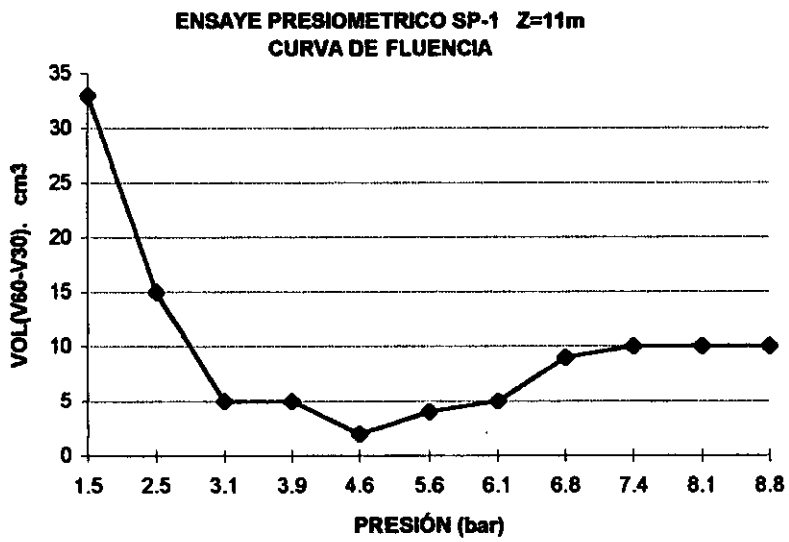


FIGURA 4.13

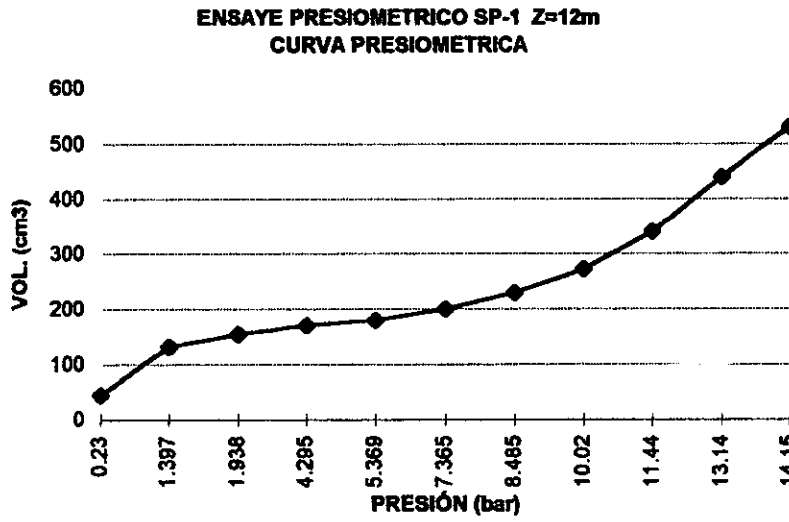


FIGURA 4.14

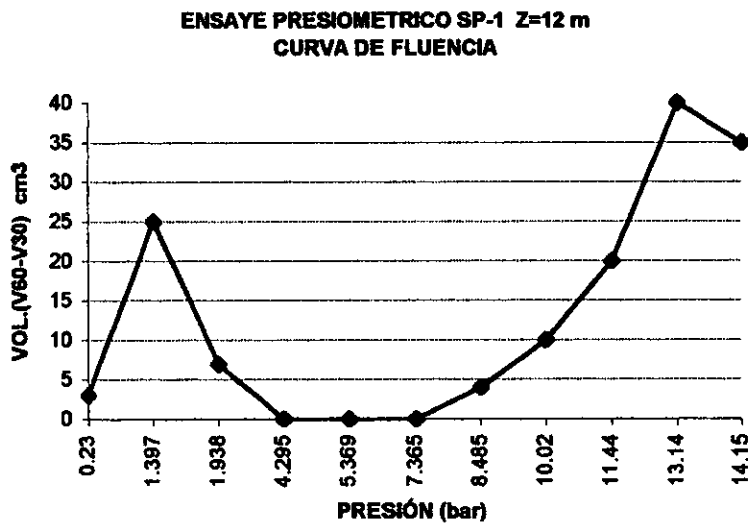


FIGURA 4.15



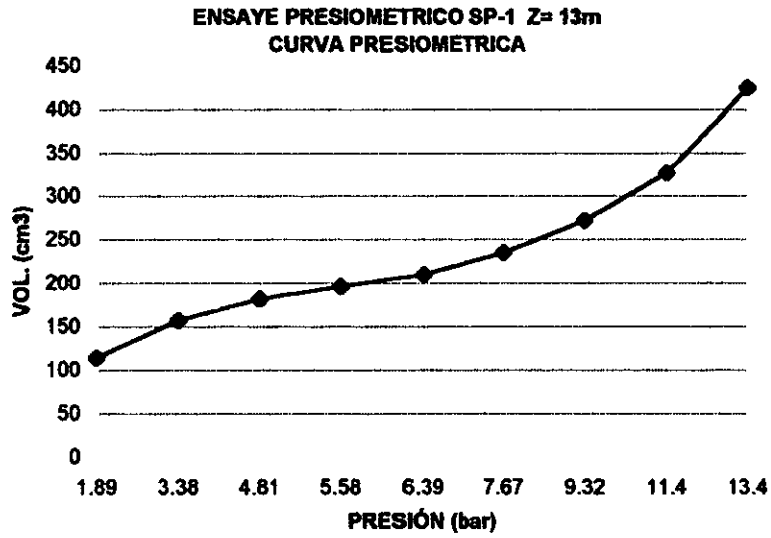


FIGURA 4.16

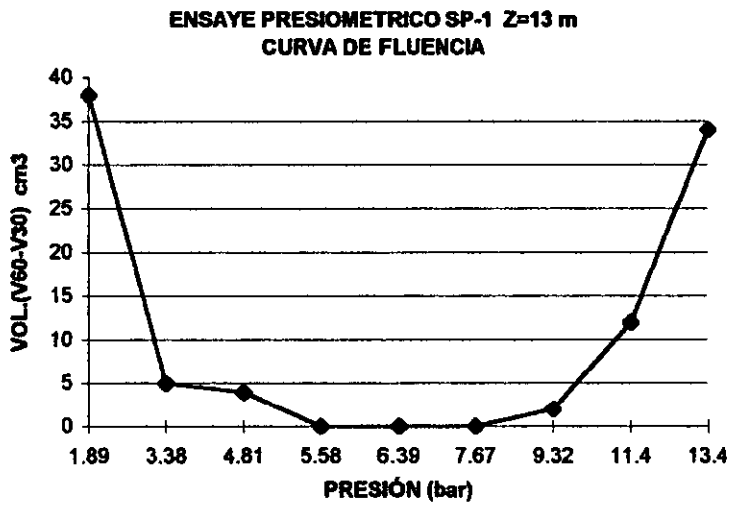


FIGURA 4.17

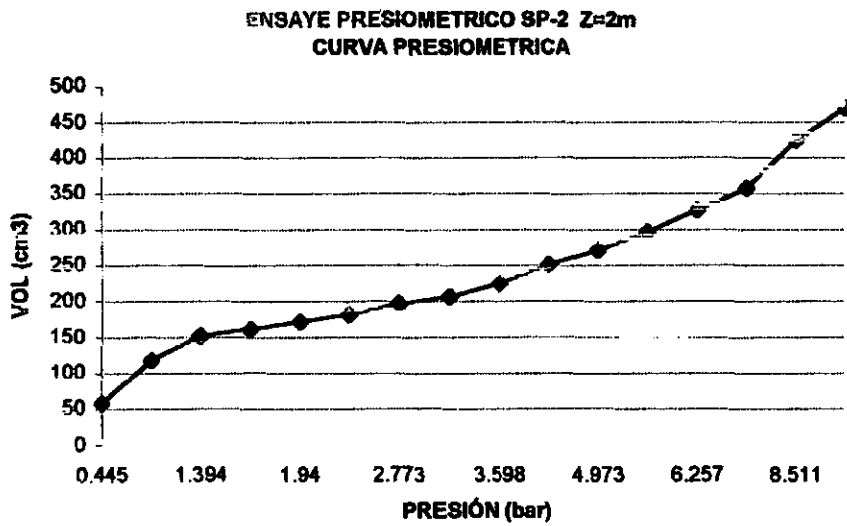


FIGURA 4.18

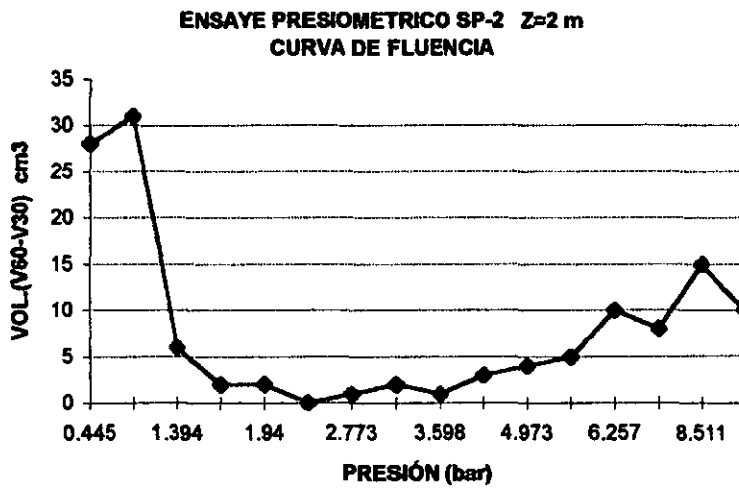


FIGURA 4.19

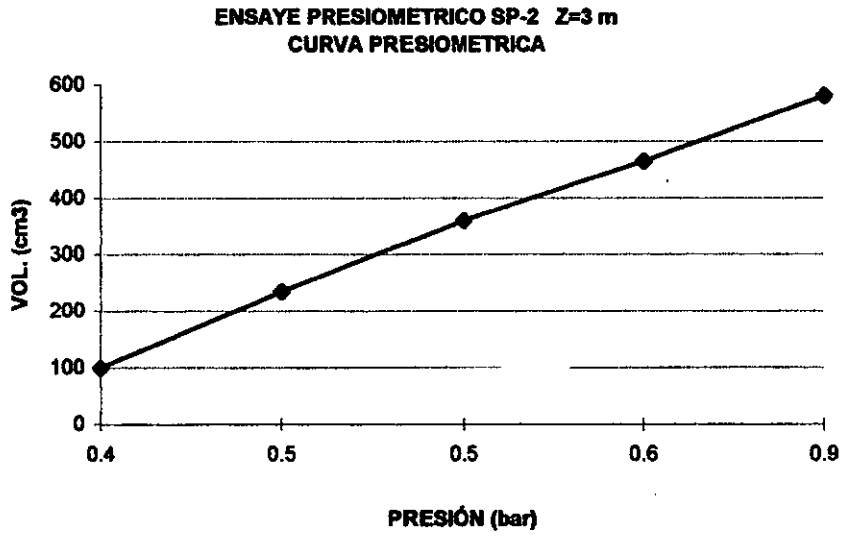


FIGURA 4.20

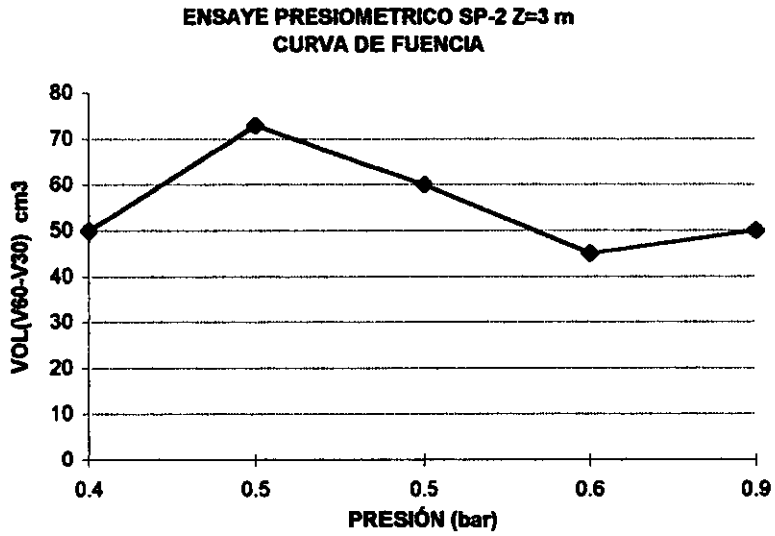


FIGURA 4.21

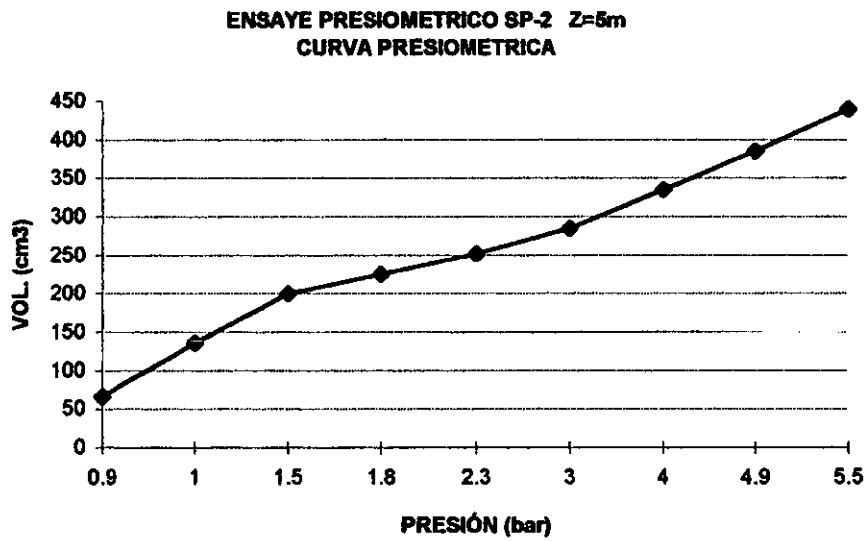


FIGURA 4.22

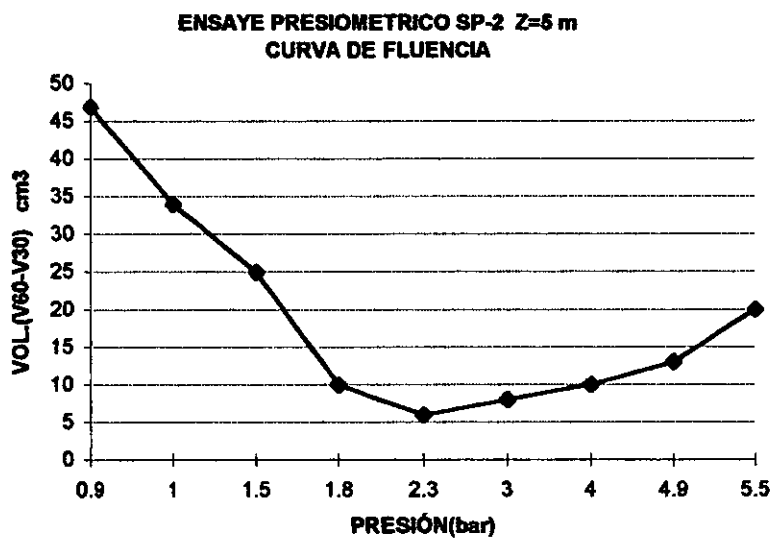


FIGURA 4.23

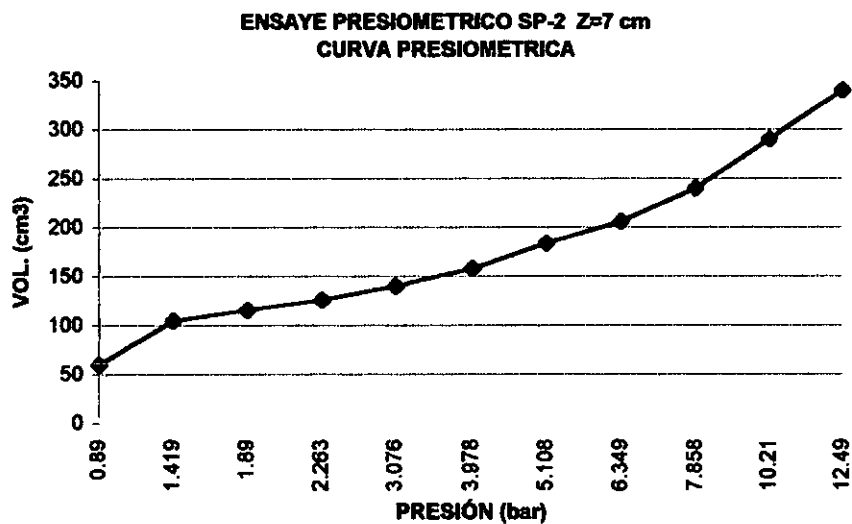


FIGURA 4.24

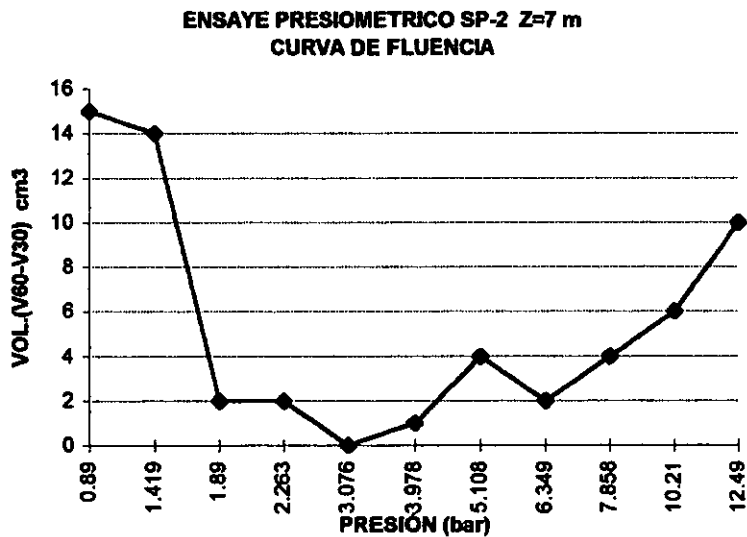


FIGURA 4.25

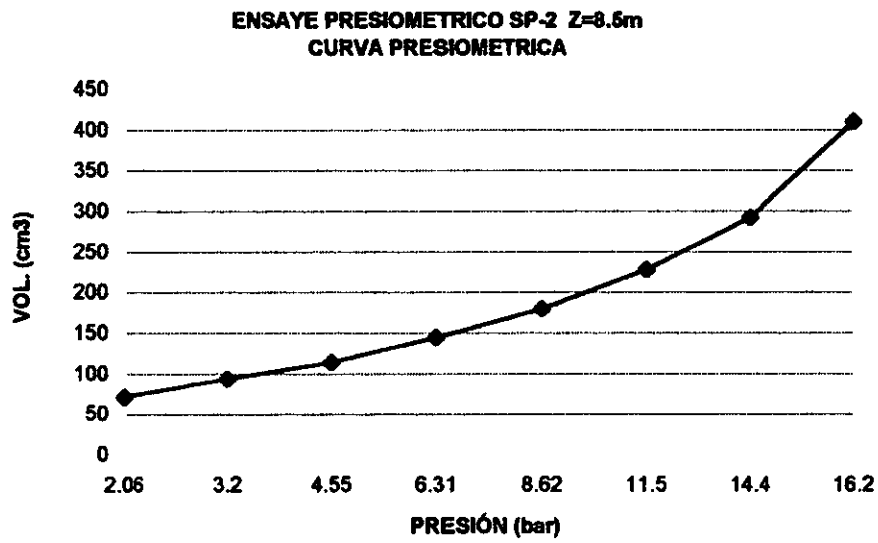


FIGURA 4.26

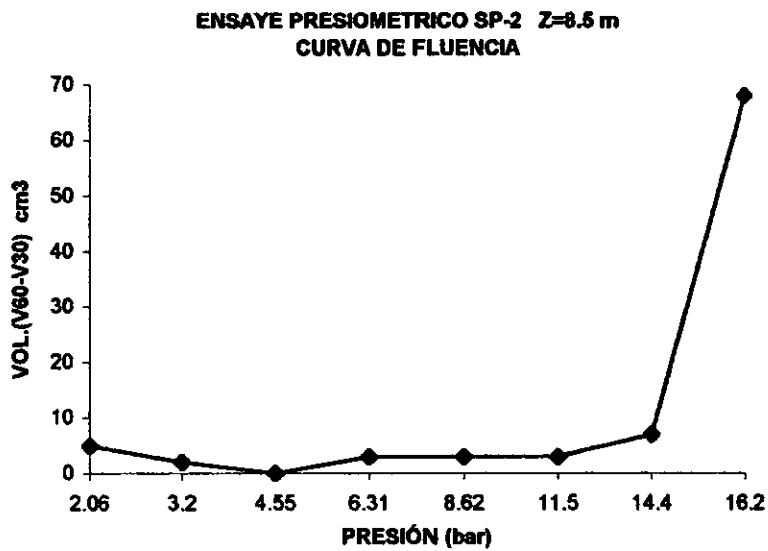


FIGURA 4.27

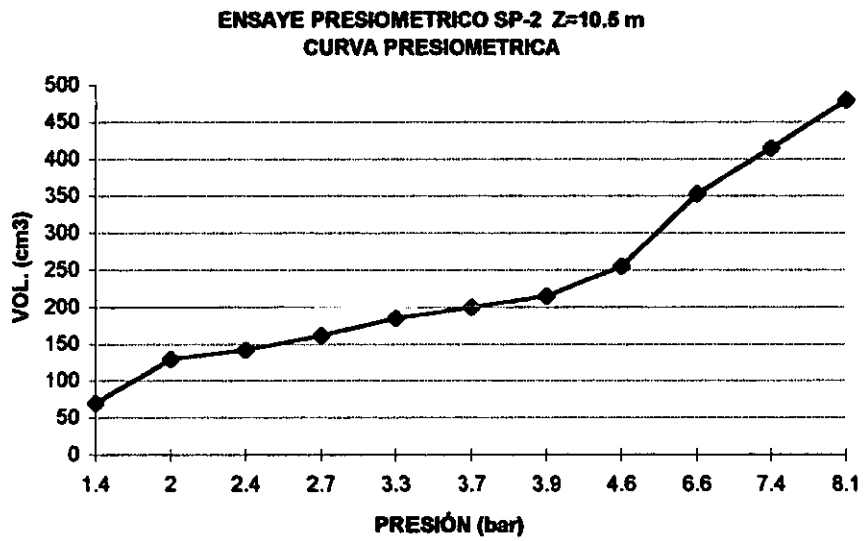


FIGURA 4.28

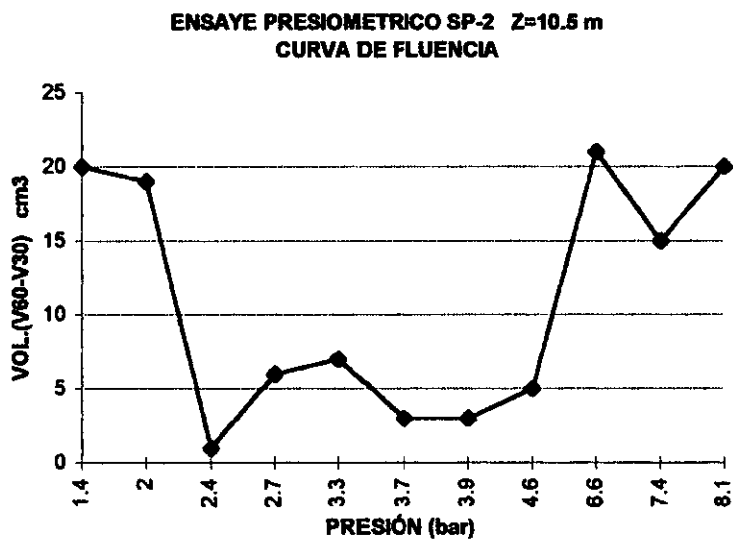


FIGURA 4.29

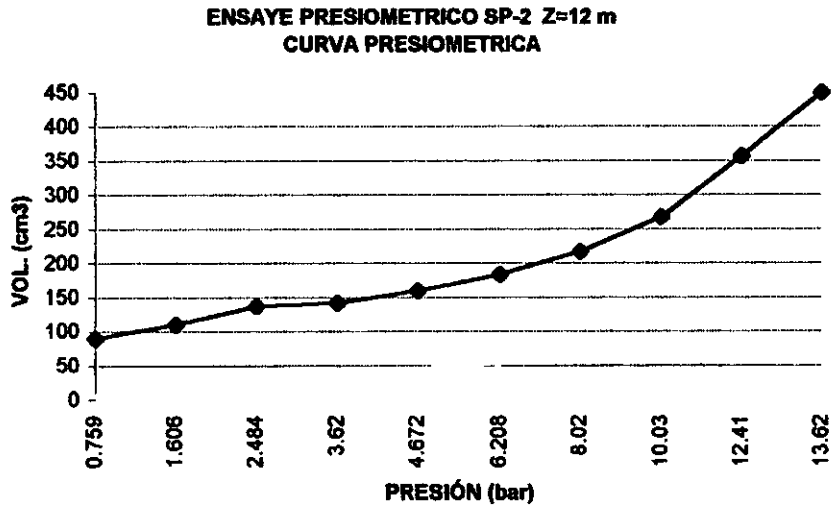


FIGURA 4.30

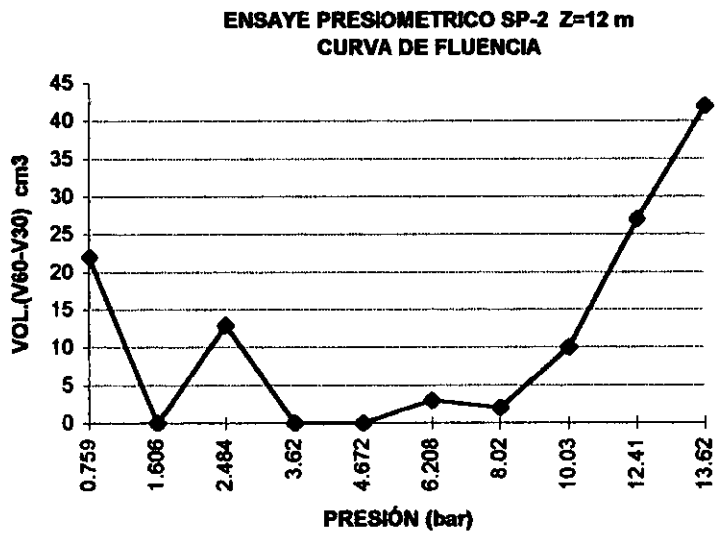


FIGURA 4.31



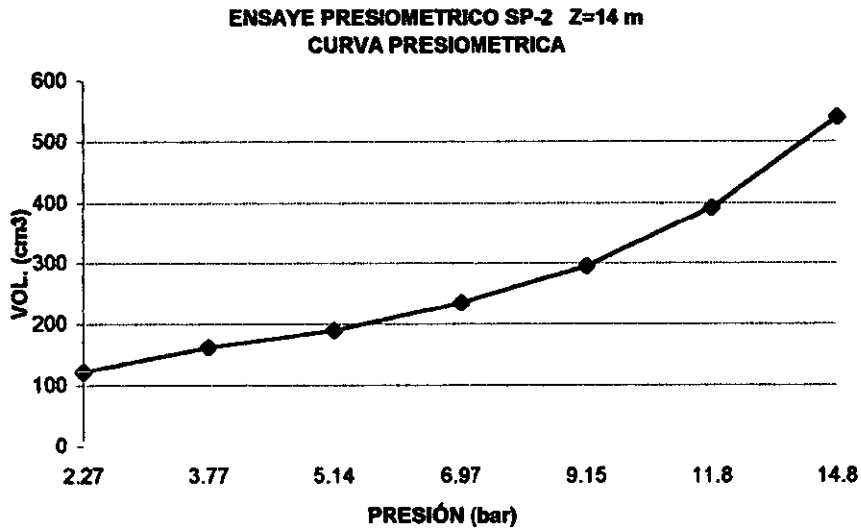


FIGURA 4.32

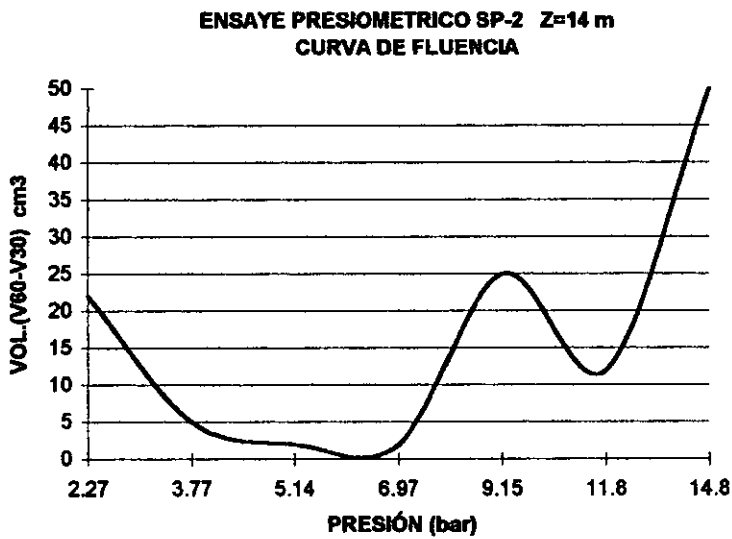


FIGURA 4.33

# PERFIL PRESIOMETRICO

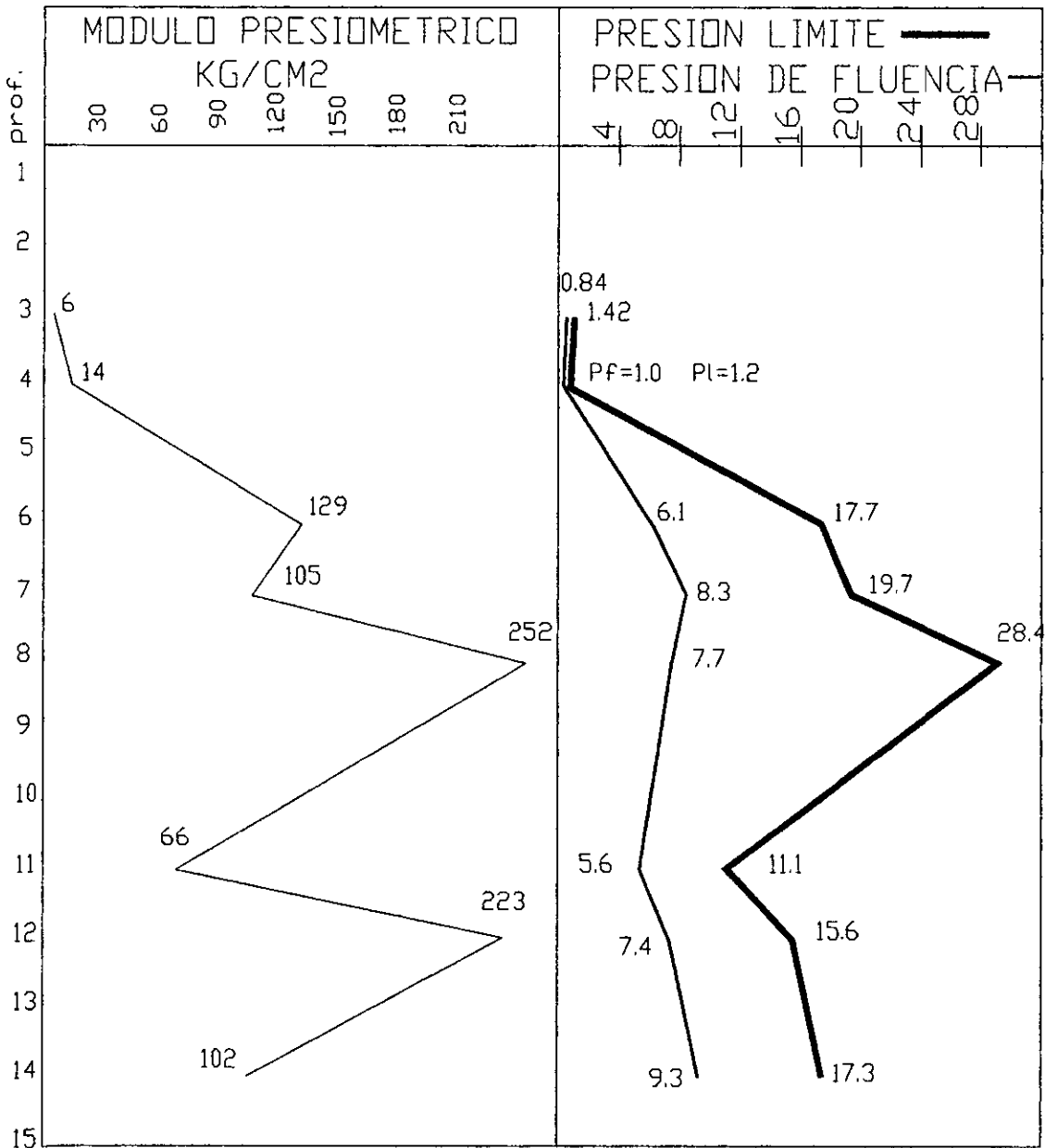
PROYECTO: TANQUE ELEVADO, C. HAB. MIRIAPOLIS, TAMPICO

M. PERFORACION: SP1, BROCA TRICONICA Y LODO BENTONITICO

SONDEO: SP-1

SONDA: BX+T, RANURADO

FECHA: MAYO 1998



PERFIL

PRESIOMETRICO

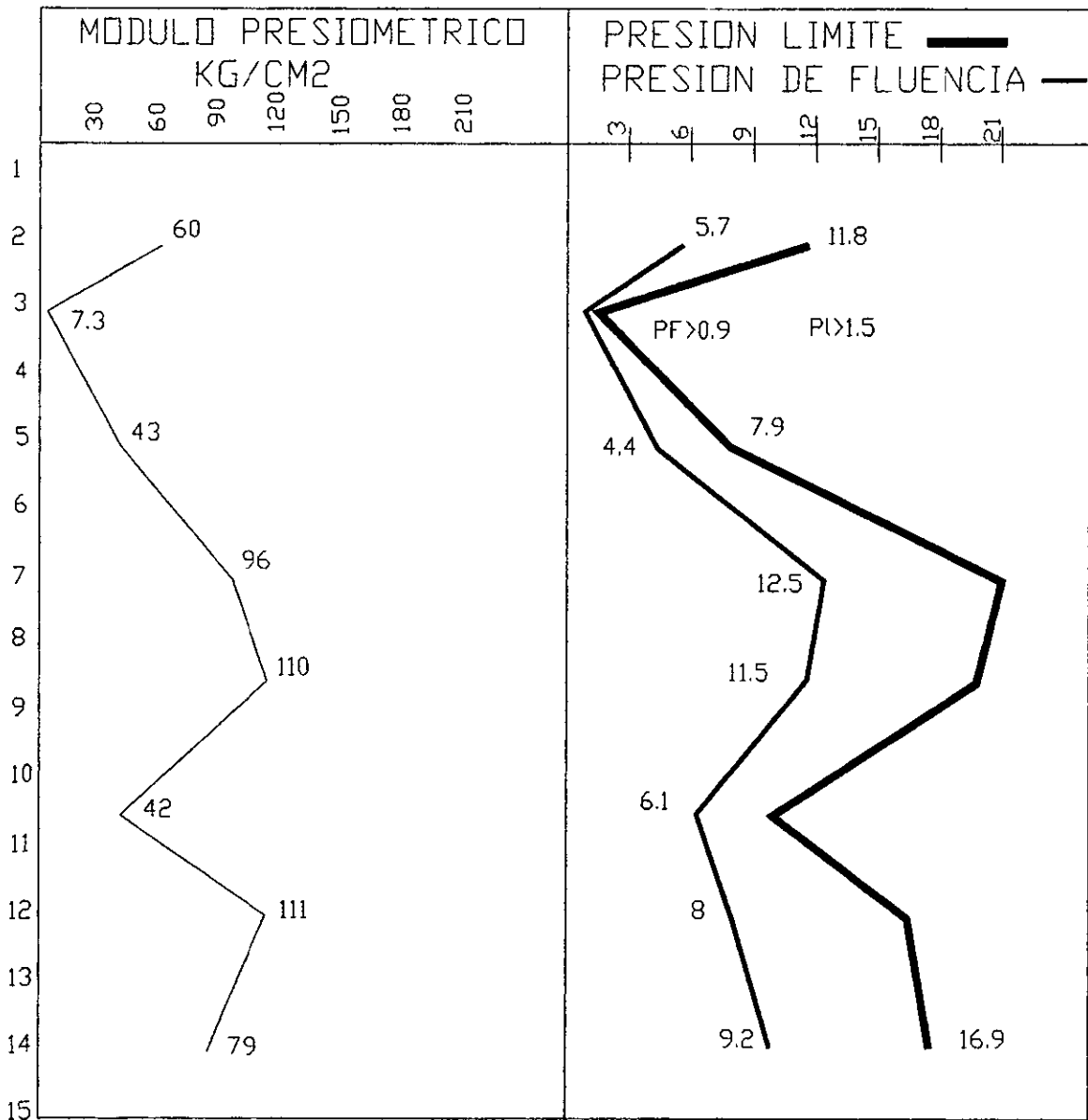
PROYECTO: TANQUE ELEVADO, c HAB. MIRIAPOLIS, TAMPICO

M, PERFORACION: SPI, BROCA TRICONICA Y LODO BENTONITICO

SONDEO: SP-2

SONDA: BX+T, RANURADO.

FECHA: MAYO 1998



#### IV.5.- CAPACIDAD DE CARGA.

Determinación de la presión corregida  $p_c$

$p_c$  = presión en el manómetro- presión de inercia+ presión de columna de agua.

Para ejemplificar como se calcularon cada una de las presiones corregidas que aparecen en las tablas anteriores. Calcularemos la primera presión corregida a 3.0 m. del ensaye SP-1 entonces:

Para una profundidad de 3.0 m. se tiene una presión de columna de agua de  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  también de la tabla del ensaye SP-1 para una profundidad de 3.0 m. se tiene una presión en el manómetro de  $0.4 \text{ kg/cm}^2$ .

Para calcular la presión de inercia , se toman en cuenta los datos de calibración de la sonda los cuales son:

vol. $\text{cm}^3$	m	b	1/m	b/m
$0 < v < 281$	374	0	$2.67 \text{ E-}03$	00000
$282 < v < 650$	671	-205	$1.49 \text{ E-}03$	$-3.06 \text{ E-}01$

por lo tanto:

$$p_c = 0.4 - (55/374) + 0.3 = 0.553 \text{ kg/cm}^2.$$

Cálculo de la carga  $q_{\text{neto}}$ .

Cisterna vacía

$q_{\text{neto}} = \frac{\text{peso de la cisterna} + \text{peso de la estructura}}{\text{área total de la construcción}} - \text{peso de la excavación.}$

área total de la construcción

$$q_{\text{neto}} = \frac{737.24 \text{ t}}{17.35 * 17.35} - 1.20 * 1.7 \text{ t/m}^3 = 0.273 \text{ t/m}^2$$

Cisterna llena:

$$q_{\text{neto}} = 0.273 + 3.65 = 3.92 \text{ t/m}^2$$

Capacidad de carga:

$$q_{\text{carga}} > q_{\text{contacto}}$$

presión de contacto = peso de la estructura + peso de la cisterna + presión del agua  
 área de la estructura.

$$\text{presión de contacto} = 2.313 + 365 = 5.963 \text{ t/m}^2$$

Incremento de esfuerzos por el momento.

incremento de esfuerzos =  $(M/I) \cdot d$

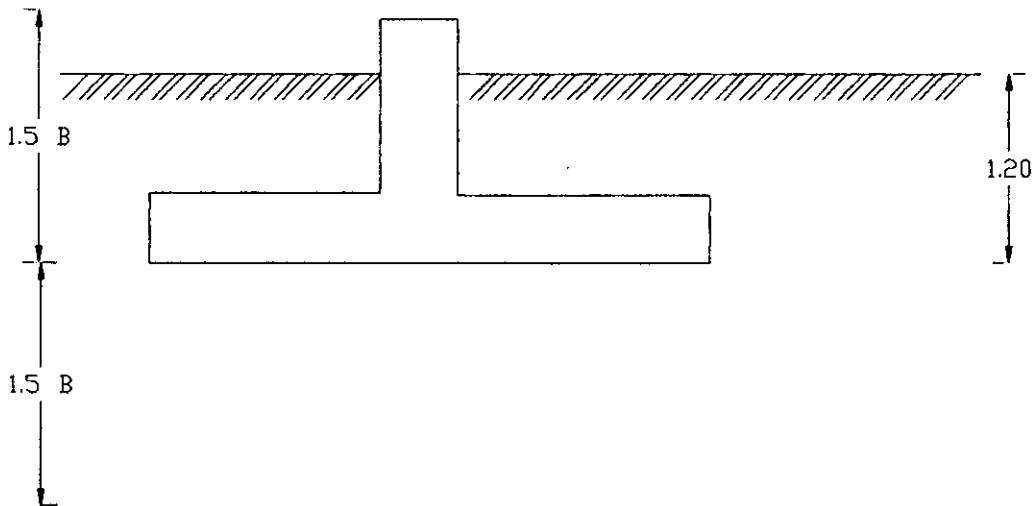
$$I = BL^3/12 = 17.85^4/12 = 8460 \text{ m}^4$$

$$\text{Incremento de esfuerzos} = \frac{425.3}{8460} * \frac{17.85}{2} = 0.449 \text{ t/m}^2$$

$$\text{Peso de contacto} = 5.963 + 0.449 = 6.412 \text{ t/m}^2$$

Cálculo de la capacidad de carga admisible  $q_a$ .

Se tiene una zona de influencia donde actúa la presión actuante de la cimentación sobre el terreno, la cuál para cimentaciones superficiales es tres veces el ancho de la cimentación:  $3(17.85) = 53.55$  m. Esta influencia actúa en el sentido vertical como se describe en la siguiente figura.



Además la presión límite equivalente dentro de la zona de influencia de la cimentación es:

$$P_{le} = [(PI)_1 * (PI)_2 * \dots * (PI)_i * \dots * (PI)_n]^{1/n}$$

$$P_{le} = (11.8 * 1.5 * 7.9 * 21 * 19.7 * 9.9 * 16.3 * 16.9)^{1/8} = 10.586 \text{ kg/cm}^2 = 105.86 \text{ t/m}^2$$

La capacidad de apoyo se calcula con la siguiente fórmula:

$$q_{\text{carga}} = q + k(p_l - p_o)$$

donde :

q.- presión vertical al nivel de desplante de la cimentación después de su construcción.

k.- factor de capacidad de carga, en función de la profundidad de desplante, de su geometría y del tipo de terreno.

$p_o$ .- esfuerzo horizontal al nivel del ensaye.

En cimentaciones superficiales q y  $p_o$  son muy pequeñas por lo que casi no influyen en el resultado final

Por lo que :

$$q_a = k p_l e / 3$$

donde: el 3 representa el factor de seguridad

Entonces :

$$D=1.2 \text{ m} \quad , B=17.85 \text{ m}$$

de la tabla 6 se tiene que  $k=1.0$

$$\text{Así} \quad q_a = 1.0 * 105.86 / 3 = 35.28 \text{ t/m}^2$$

$$q_a = 35.28 \text{ t/m}^2$$

#### IV.6.- DEFORMACIONES

Cálculo de los asentamientos.

$$s = \frac{2}{9E_m} q B_o (\lambda_d B_o)^\alpha + \frac{\alpha}{9E_m} q \lambda_c B$$

donde:

s.- asentamiento

$B_o=0.6$  (Baguelin. 1978)

B.- ancho de la cimentación

D.- Profundidad de desplante de la cimentación

q.-presión aplicada al suelo

$\lambda_d, \lambda_c, \alpha$  de las tablas 3.48,3.49

Para el ejemplo:

$$B=17.85 \text{ m}$$

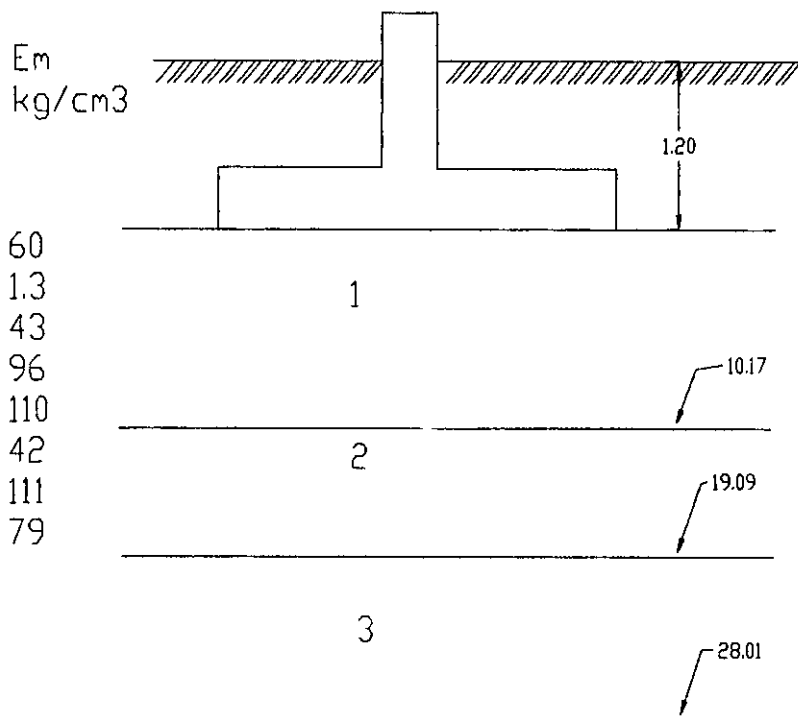
$$D= 1.2 \text{ m}$$

$$L=15.85 \text{ m}$$

$$q =6.412 \text{ t/m}^2$$

$$R=B/2=17.85/2= 8.92 \text{ m}$$





$$E1=5/Ei = 5/(1/60 + 1/73 + 1/43 + 1/96 + 1/110) = 5/0.1964 = 25.45 \text{ kg/cm}^2$$

$$E2=3/Ei = 3(1/42 + 1/111 + 1/79) = 65.96 \text{ kg/cm}^2$$

$$1/Ed = 0.25 (1/254.5 + 1/(.85 \cdot 659.6)) = 1/700.17 \text{ t/m}^2$$

$$Ed = 700.17 \text{ t/m}^2$$

$$Ed/Pl = 700.17/105.86 = 6.614$$

$$L/B = 17.85/17.85 = 1.0$$

$$D/B = 1.2/17.85 = 0.0672$$

de tablas 3.48 y 3.49

$$\lambda_d = 1.12, \lambda_c = 1.10, \alpha = 1/3$$

Por lo tanto:

$$s = \frac{2}{9 \cdot 700.17} (6.412)(0.6) \{1.12 \cdot (17.85/0.6)\}^{1/3} + \frac{1}{3} \frac{1}{9 \cdot 700.17} \cdot 6.412 \cdot 1.1 \cdot 17.85 =$$

$s = 0.01058 \text{ m} = 1.058 \text{ cm}$ . Esta deformación es aceptable de acuerdo con el RCDF.

Los cálculos de los datos se lograron obtener sin ningun problema, por lo que una vez mas se confirma que la interpretación de los resultados de un ensaye presiometrico pueden resultar no muy complicada y de confiabilidad aceptable.

## CONCLUSIONES

El ensaye presiométrico es una herramienta muy útil para el ingeniero geotécnico, ya que permite obtener parámetros de diseño, como son la resistencia última de los materiales del subsuelo, deformabilidad, ángulo de fricción interna, entre otros. Además este tipo de ensaye es adecuado para materiales donde las otras técnicas de exploración encuentran limitaciones graves de aplicación.

La información obtenida de un ensaye con el presiómetro es la respuesta del terreno en estudio ante el incremento de presión. Esta respuesta generalmente se muestra en una curva esfuerzo- deformación, la cual depende del tipo de sonda, método de instalación y procedimiento de la realización del ensaye. Los parámetros obtenidos de la interpretación del ensaye dependen del método de interpretación utilizado.

Los presiómetros se agrupan en relación con su forma de instalación. Para la instalación de un presiómetro con perforación previa es necesario crear una perforación, en la cual el volumen del suelo extraído debe ser menor a el volumen de la sonda. El presiómetro autoperforante crea su propia perforación por barrenación propia, el volumen de la sonda es igual a el volumen de suelo reemplazado. El presiómetro de empuje desplaza el suelo al momento de ser introducido en el sitio de ensaye.

Los presiómetros con perforación previa pueden ser utilizados en suelos donde se pueda crear una perforación estable, los autoperforantes se utilizan en suelos libres de grava y roca blanda, y el presiómetro de empuje puede ser utilizado en donde sea factible introducir el cono estático.

Generalmente se utilizan cuatro procedimientos de ensaye, el Ménard, esfuerzos controlados, deformación controlada, y esfuerzo - deformación, controlados. El procedimiento Ménard utiliza una sonda de tres celdas de desplazamiento de volumen y se obtienen parámetros de diseño empíricos, como son.

El uso del presiómetro, en países como Francia, Inglaterra y Japón tiene más de treinta años, sin embargo en nuestro país su utilización más extensiva se remonta a una decena de años.

El uso del presiómetro esta aumentando ya que la información obtenida del ensaye presiométrico es de una calidad confiable, rápida y de bajo costo.

## REFERENCIAS.

- AMAR S: te. al. The application of pressuremeter test results to foundation design in Europe. Report to the ISSMFE. 1957, No. 14, pp. 357-377
- ASTM Standard D4719-87. Standard test method for pressuremeter testing in soils, 1988
- BAGUELIN F. te al. The pressuremeter and foundation engineering. trans Tech., 1978
- BRIAUD J. L. The pressuremeter. Balkeema, Rotterdam, 1992
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Eurocode 7 (1995) geotechnical design. part. I Butterworth, 1987
- CLARKE B. G. A practical guide to the derivation of undrained shear strength from pressuremeter test. Proc. Int. Conf. on Advances on site Investigation, London. pp. 556-570
- CLARKE B. G. and ALLAN P. G. Selfboring pressuremeter for testing weak rock. Int. proc. 12th Int. Conf. SMFE, Rio de Janeiro, 1989, vol 1, pp. 211-213
- CLARKE B. G. Pressuremeter in geotechnical design. Blackie, Glasgow, 1995
- CLARKE B. G. and SMITH A. A model specification for radial displacement measuring pressuremeters. Ground Engineering. 1992a, 25, No. 2. pp. 28-38
- CLARKE, B.G. Pressuremeter testing in ground investigation , Part.I  
Proceedings of the Institution of civil engineers Geotechnical Engin. Vol 119  
n. 2 April 1996. pp. 96- 108
- CLARKE, B.G. Pressuremeter testing in ground investigation , Part.II , Proceedings  
of the Institution of civil engineers Geotechnical Engin. Vol 125 n. 2 Jan  
1997. pp. 42- 52
- CLARKE, B.G. Pressuremeter testing in ground investigation , Part.III Applications,  
Proceedings of the Institution of civil engineers Geotechnical Engin.  
Vol 125 n. 2 April 1997. pp. 97- 108

- FINN P. S. et al. Guidance on pressuremeter, flat dilatometer and cone penetration testing Proc 20th Reg. Mg of Engng Group Geol Soc, 1984, N0, pp. 223-233
- GIBSON In situ measurements of soil properties with the pressuremeter . Civ. Engng Public, 1961, 56, 615-618
- GOST 20276-85 (translated by Foque j. b. and SOUSA COUTINHO A. G. F. ) (1985) SOIL METHODS FOR DETERMINING DEFORMATION CHARACTERISTICS.
- HUGHESJ.M.O.andERVINM.C delopment, of a high pressure pressuremeter for determining the engineering properties of soft to medium streng rocks. proc. 3rd Australia-new zealand. conf. on geomechanics, Wellington, 1980, Vol 1 , pp. 243-247
- ISRM. Suggested methods for deformability determination using a flexible dilatometer. 1987, pp 125-143
- JEFFERIES M. Determination of horizontal geostatic stress in clay with self-boring pressuremeter . Can. Geotech. 1988,25, No. 23 , pp. 559-573.
- LCPC-SETRA Régles de justification des fondations sur pieux á partir des resultats des essais pressionométriques. Ministre de l'Urbanisme du Logement te des Transport, Paris, 1985
- LEISCHNER W. Die bautechnische. Der Bauingenieur, 1966, 12
- MAIR R. J. and WOOD D. M. Pressuremeter testing-methods and interpretation,
- MENARD L. Measures in situ des propriétiés physiques des sol. Annales des ponts te Chaussees.
- MUIR-WOOD D. Strain dependent moduli and pressuremeter test, Geotechnique, 1990. 40, No. 26 , 509-512
- PALMER A. C. Undrained plane-strain expansion of cylindrical in clay . Géotechnique, 1972,22,No.23, 451-457.
- SHIELDS D. H. and BAUER G. E. Determination of the modulus od deformation of sensitive clay using laboratory and insitu test, Proc. ASCE Spec. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, 1975, Vol 1 , pp. 395-421

SUYAMA K. et al. Studies of transverse Kvalue of ground. soild and funfations ,1966,  
14, No. 10

WITHERS N. J. et al. The development of a full displacement pressuremeter. proc.  
2nd Int. Symposium pressuremeter marine appl, texas, USA,1986, ASTM ,  
No STP 950, pp. 38-56

WROTH C. P. and HUGHES J. M. O. An instument for the in-situ measurement of the  
. properties of soft clays. proc. 8th int. conf. SMFE, Moscow, 1973,  
Vol 1.2, pp. 487-494