

## PRIMERAS EXPERIENCIAS CHILENAS CON EL PRESIOMETRO

Pedro ACEVEDO M.\*  
Pedro ORTIGOSA de P.\*  
Pedro VERA N.\*\*

### RESUMEN

*Se presentan los resultados obtenidos de experiencias chilenas relativas al empleo del presiómetro en suelos finos y granulares. Se incluyen determinaciones del coeficiente de empuje en reposo, módulos de deformación en regímenes de carga estática y cíclica, determinaciones del coeficiente de estructura y de balasto. Los resultados se comparan con los obtenidos en ensayos de laboratorio y en una prueba de carga horizontal practicada en un pilote. Dichos resultados ponen de manifiesto las ventajas que se logran al emplear técnicas presiométricas para determinar in situ las propiedades mecánicas del suelo tanto en régimen de carga estática como cíclica.*

### INTRODUCCION

Los sistemas de fundación diseñados para transmitir solicitaciones al suelo pueden clasificarse como superficiales (zapatas), intermedios (pilas) o profundos (pilotes), según la ubicación de los bulbos de presiones o zonas plastificadas con respecto a la superficie del terreno, Fig. 1. Cuando el dominio plástico alcanza la superficie se trata de una fundación superficial en donde no se considera la restricción lateral del suelo que rodea a la fundación.

---

\* Ingeniero Investigador del IDIEM.

\*\* Memorista del IDIEM.

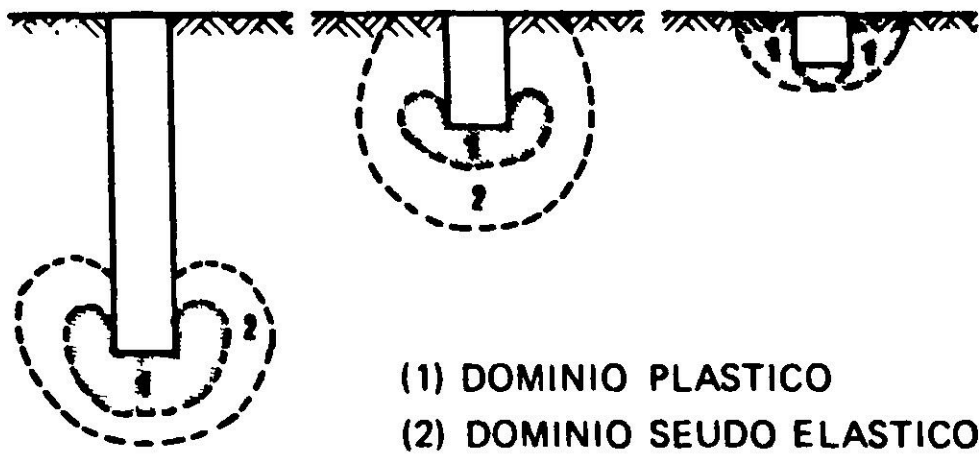


Fig. 1. Ubicación de los diferentes dominios de tensiones con respecto a la profundidad de enterramiento de la fundación.

En las fundaciones intermedias solo el dominio elástico alcanza la superficie, debiéndose considerar en los diseños tanto la restricción de base como lateral.

En las fundaciones profundas los dominios plásticos y elásticos se encuentran insertos dentro de la masa de suelo, debiéndose considerar el efecto de adherencia en la evaluación de la capacidad de soporte a cargas verticales ya que la razón longitud-ancho es muy elevada.

Cuando las fundaciones, sean éstas superficiales, intermedias o profundas, se ven sometidas a sollicitaciones estáticas y/o cíclicas, tradicionalmente se las diseña utilizando métodos teóricos y/o empíricos. Recientemente, con la implementación del presiómetro aparece un nuevo método, de tipo analógico que, a diferencia de otros ensayos de terreno (por ej. índice de penetración con

cuchara normal SPT) no sólo entrega información del estado límite del suelo, sino que además condiciones intermedias de sus fases plástica y pseudo elástica.

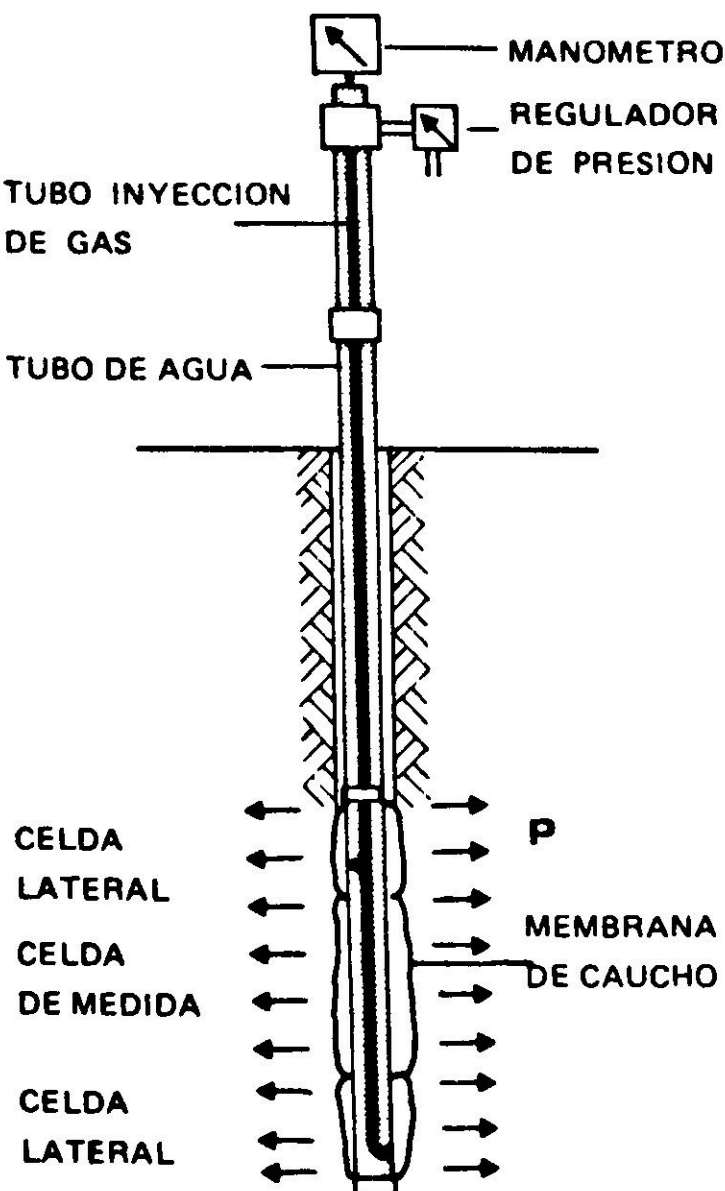


Fig. 2. Esquema sonda presiométrica Menard.

El objetivo de este trabajo es presentar algunos resultados de las primeras mediciones presiométricas efectuadas en Chile, tanto en régimen estático como cíclico, con el fin de mostrar la versatilidad de esta nueva técnica para determinar propiedades del suelo *in situ*. Debido a que dichas determinaciones hacen uso de los sondajes necesarios para la prospección del suelo, su implementación representa un costo marginal dentro del costo de la exploración. Más aún, presentan la ventaja de definir *in situ* y en profundidad características tensión-deformación del suelo en ambientes difíciles (por ej. bajo napa). Finalmente, para ilustrar la aplicación de esta nue-

va técnica de medición, se analiza el caso de fundaciones cargadas lateralmente. Específicamente se comparan los desplazamientos laterales obtenidos en una prueba de carga horizontal efectuada sobre un pilote, con los calculados a base de resultados de ensayos presiométricos.

En la Fig. 2 se esquematiza el equipo presiométrico, que consiste esencialmente en un cilindro de pared flexible en cuyo interior se inyecta agua a presión. De este modo se produce la expansión radial de la cavidad (pared del sondaje) llevándose un registro presión aplicada,  $p$ , en función del volumen de agua inyectado en la celda de medida,  $v$  (aumento de volumen de la cavidad). En la Fig. 3 se presenta un resultado típico  $p$  vs  $v$ , que corresponde a lo que tradicionalmente se denomina curva presiométrica, en la cual es posible definir los siguientes términos:

$p_{oh}$  = Presión horizontal del suelo en régimen geostático

$E_m$  = Módulo presiométrico o módulo de Young del suelo

$V_m$  = Volumen promedio de la cavidad en la zona pseudo elástica AB

$V_c$  = Volumen inicial de la cavidad

$p_l$  = Presión límite que produce la falla por corte generalizado del suelo en el entorno de la cavidad.

$\nu$  = Módulo de Poisson del suelo

La Fig. 4 corresponde a un perfilaje típico en profundidad de los parámetros presiométricos  $p_l$  y  $E_m$ , el que muestra una razonable concordancia con el perfilaje correspondiente al tradicional índice de penetración estándar, SPT, obtenido con cuchara normal.

## PROPIEDADES DEL SUELO

### Determinación de $K_o$ y de la presión geostática

La evaluación de la restricción lateral en fundaciones requiere normalmente conocer el coeficiente en reposo del suelo,  $K_o$ , el que se obtiene en forma indirecta utilizando correlaciones empíricas o mediante ensayos de laboratorio con control de la deformación radial de la probeta. En el ensaye presiométrico se inducen deformaciones radiales en la pared de la cavidad pudiéndose entonces determinar la presión geostática en reposo,  $\bar{p}_{oh}$ , y el correspondiente coeficiente  $K_o$ . La Fig. 5 muestra determinaciones de  $\bar{p}_{oh}$  y  $K_o$  en una arcilla preconsolidada<sup>1</sup>. En la evaluación de  $K_o$  se utilizó el valor de  $\bar{p}_{oh}$  obtenido con el presiómetro y el valor de la presión vertical efectiva  $\bar{p}_{ov}$ , debida al peso propio del suelo. Por otra parte, como se disponía de ensayos edométricos a ciertas profundidades, fue posible obtener la razón de preconsolidación de la arcilla, RPC. Con los valores de RPC y el índice de plasticidad de las muestras se obtuvieron valores del coeficiente  $K_o$  utilizando las relaciones empíricas de Wroth<sup>2</sup>. Los valores de  $K_o$  así obtenidos se incluyen en la Fig. 5 mostrando una excelente concordancia con los determinados mediante el presiómetro.

En ensayos presiométricos realizados en limos y arenas limosas normalmente

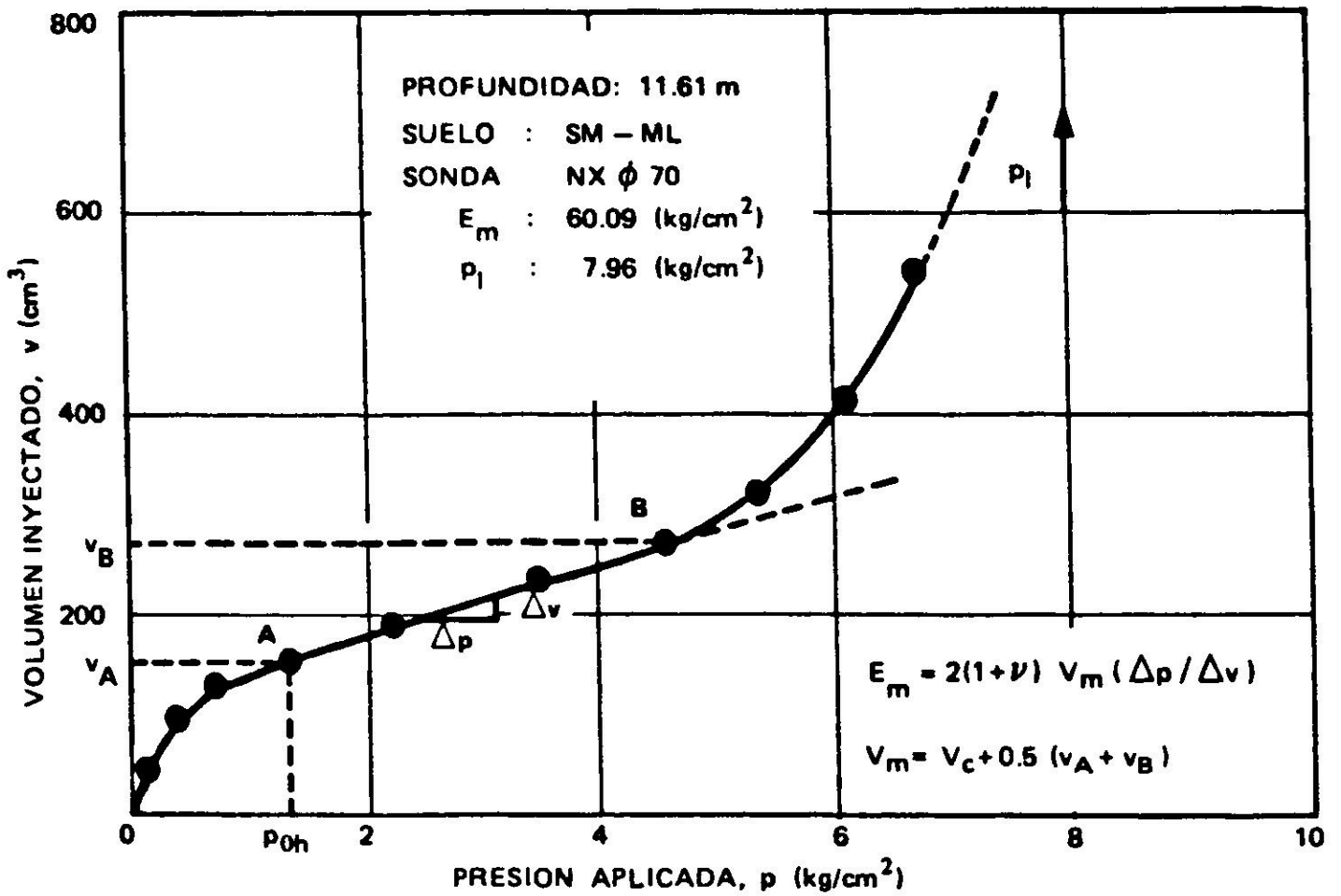


Fig. 3. Curva presiométrica típica en un ensayo estático.

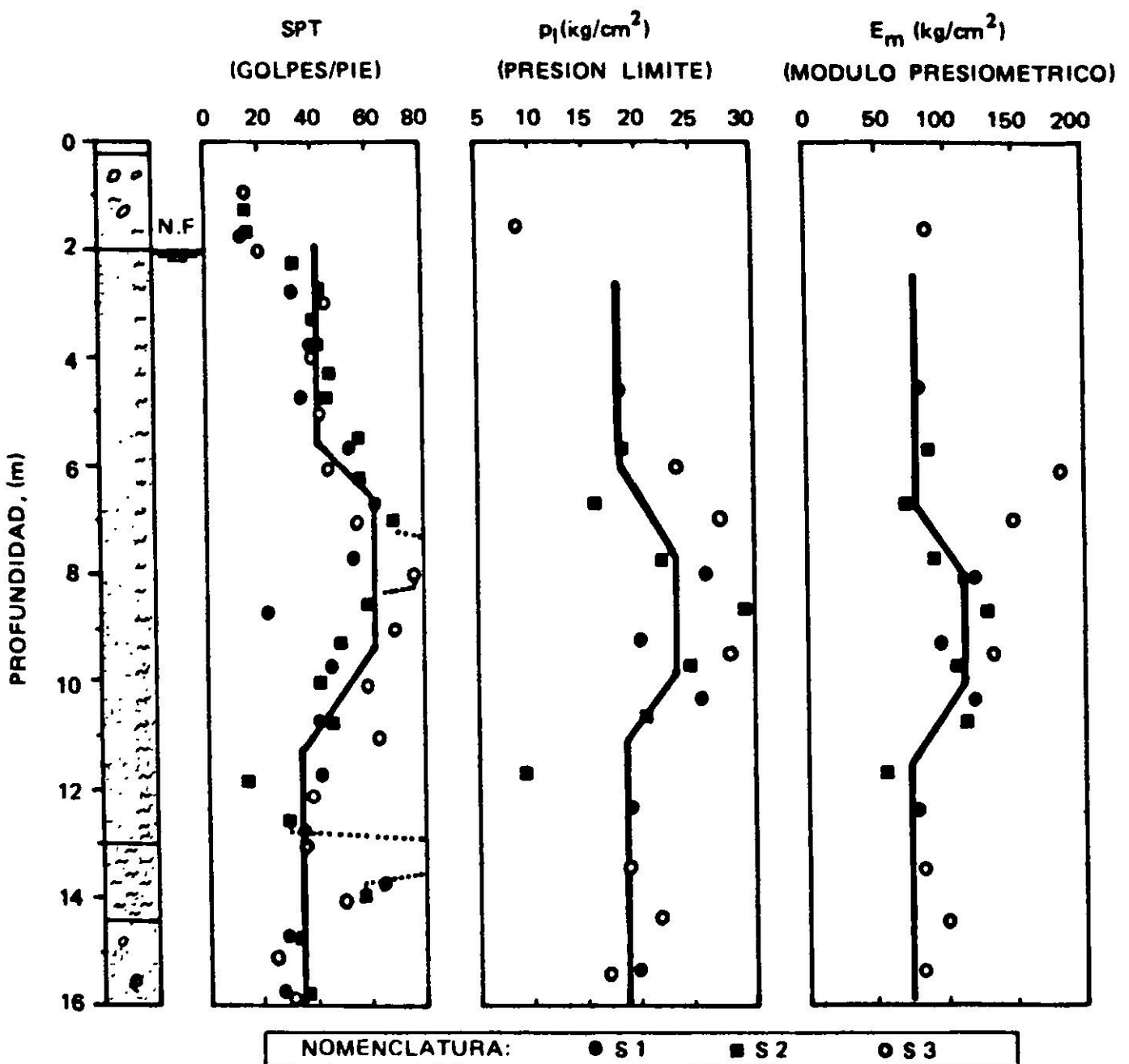


Fig. 4. Perfilaje en arenas del índice de penetración estándar SPT y de los parámetros presiométricos  $E_m$ ,  $p_l$ .



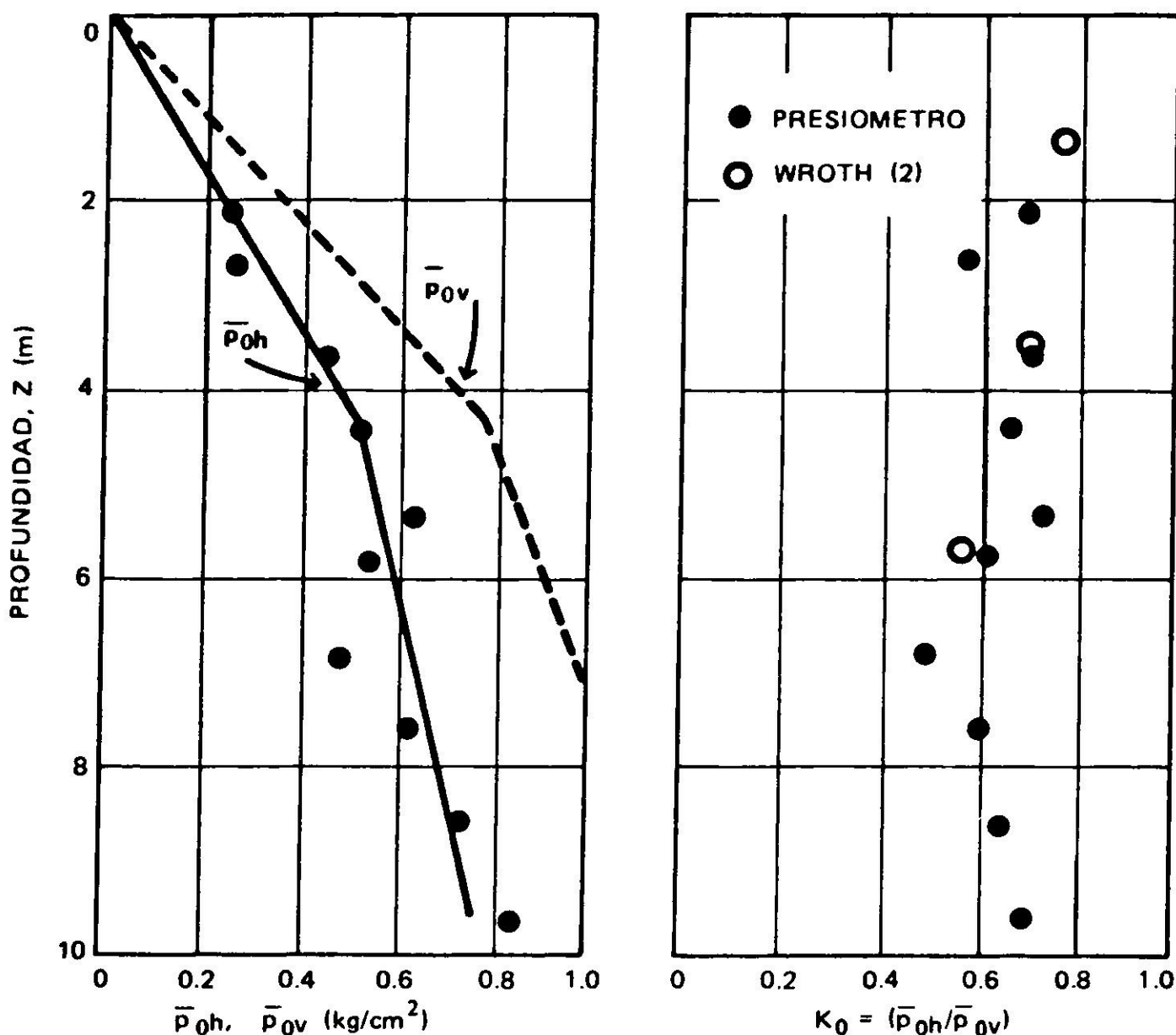


Fig. 5. Presión efectiva horizontal en reposo y coeficiente  $K_0$  en función de la profundidad para una arcilla preconsolidada<sup>1</sup>.

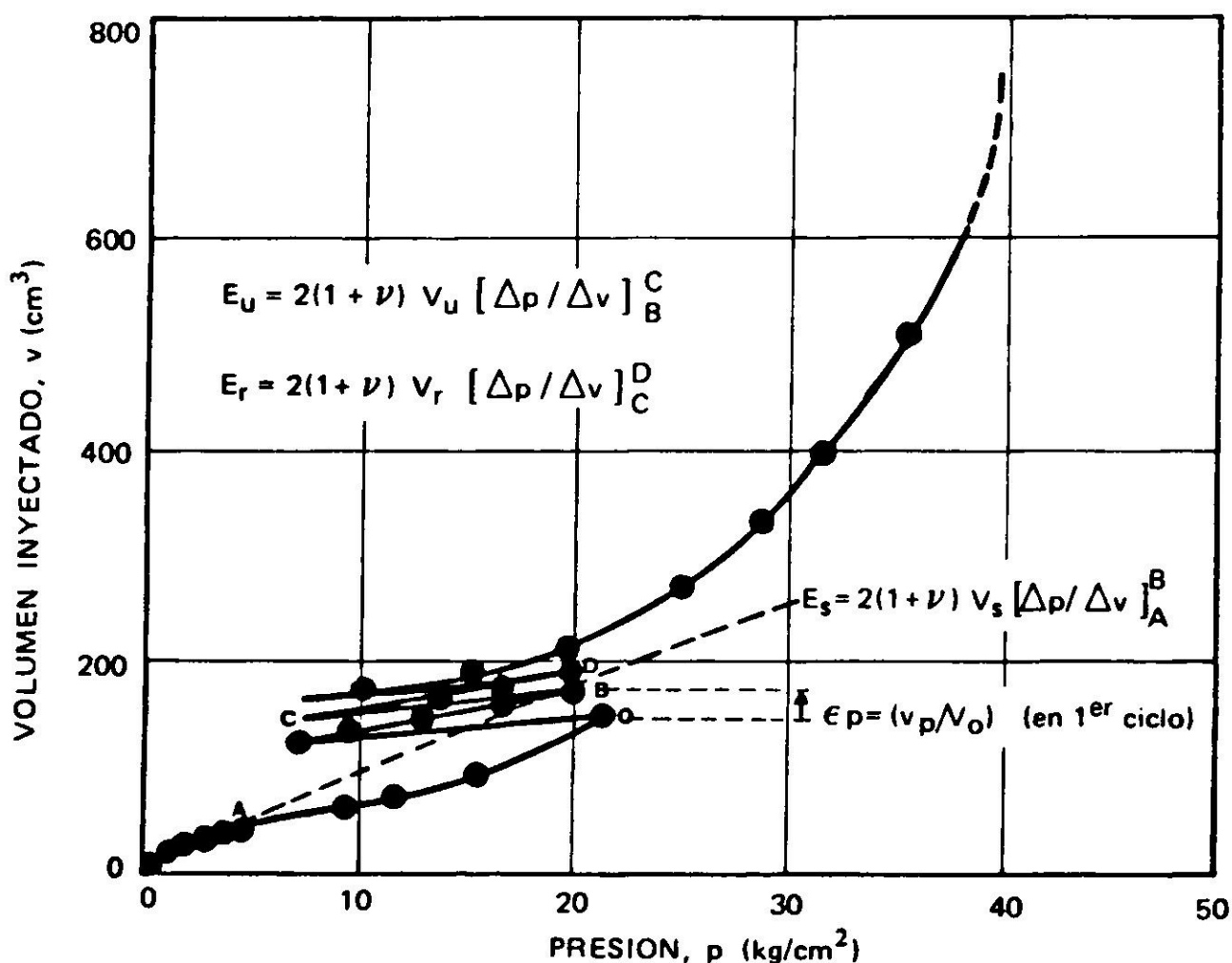


Fig. 6. Ensaye presiométrico cíclico en arena limosa con ligera cementación (pumicita).

consolidadas se han obtenido valores de  $K_0$  promedios iguales a  $0.57 \pm 0.08$  y  $0.51 \pm 0.13$  respectivamente<sup>1</sup>.

## Determinación de módulos presiométricos estáticos y cíclicos

### Módulo estático

El módulo presiométrico estático,  $E_m$ , es medido en un campo de tensiones desviador, siendo proporcional a la pendiente de la curva presiométrica en la fase pseudo elástica (trazo AB en Fig. 3). La Fig. 4 muestra determinaciones de  $E_m$  en función de la profundidad para arenas. Esta posibilidad de poder contar con un perfilaje del módulo de deformación hace que el método sea uno de los más indicados para el estudio de deformaciones en fundaciones superficiales y, muy especialmente, en fundaciones profundas.

### Módulo dinámico

Los ensayos presiométricos se realizan normalmente hasta alcanzar la presión límite. Sin embargo, es posible realizar ensayos con ciclos de carga y descarga orientados al estudio del comportamiento del suelo sometido a cargas cíclicas. Esta nueva modalidad del ensayo presiométrico permite determinar los módulos de deformación en cada ciclo empleando el mismo principio de cálculo utilizado para los módulos presiométricos estáticos.

En la Fig. 6 se define el módulo secante cíclico,  $E_s$ , los módulos en descarga  $E_u$ , y en carga,  $E_r$ , y la deformación plástica,  $\epsilon_p$ , correspondiente a resultados de un ensayo cíclico realizado en pumicita en la Planta Experimental de IDIEM en Cerrillos. En dicha figura el término  $V_0$  se ha definido convencionalmente como  $V_c + v_0$  siendo  $v_0$  el volumen inyectado para alcanzar el punto 0 de la curva y  $V_c$  el volumen inicial de la cavidad. El resto de los términos se definen como:

$$v_p = v_B - v_0 \text{ (1}^{\text{er}} \text{ ciclo)}, \quad v_p = v_D - v_0 \text{ (2}^{\text{o}} \text{ ciclo)} \dots; \quad V_s = V_c + 0.5(v_B + v_A);$$

$$V_u = V_c + 0.5(v_C + v_B); \quad \text{y} \quad V_r = V_c + 0.5(v_D + v_C).$$

La Fig. 7 muestra la variación de  $E_s$  y  $\epsilon_p$  en función del número de ciclos, destacándose la linealidad de estos dos parámetros en coordenadas semilogarítmicas. Estos resultados podrían constituir una potencial aplicación de los ensayos presiométricos a problemas de cargas laterales cíclicas en pilotes, deformaciones permanentes de pavimentos bajo tráfico pesado y a otros problemas propios de dinámica de suelos.

Diversas investigaciones<sup>3,4</sup> postulan que la razón entre el módulo de descarga  $E_u$  y el de recarga  $E_r$  se relacionan en el ciclo  $N$  según  $(E_u/E_r) = 1 + \beta N^{-n}$  donde  $\beta$  y  $n$  son parámetros característicos del suelo ensayado. En la Fig. 8 se presenta la variación de  $(E_u/E_r) - 1$  versus el número de ciclos, resultando valores de  $\beta$  y  $n$  iguales a 1.2 y 1.0 respectivamente. Estos valores están dentro de los rangos obtenidos en estudios anteriores, donde  $n$  varía entre 0.3 y 1 con un valor

promedio de 0.7 y  $\beta$  entre 0.0075 y 3.0 con un promedio de 0.58.

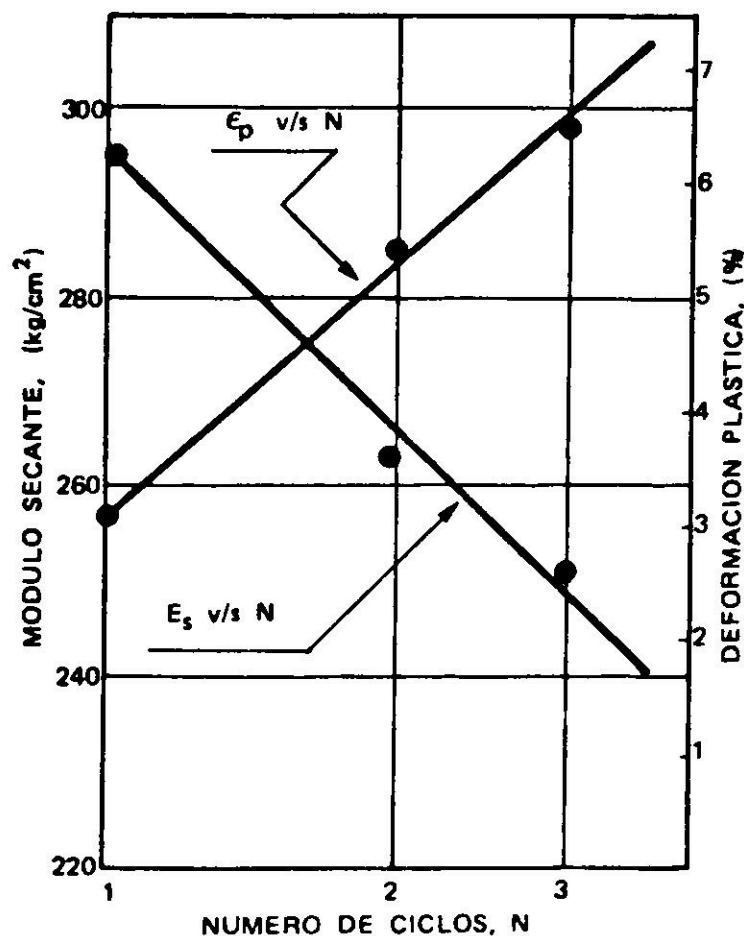


Fig. 7. Módulo secante cíclico y deformación plástica en función del número de ciclos en pumicita.

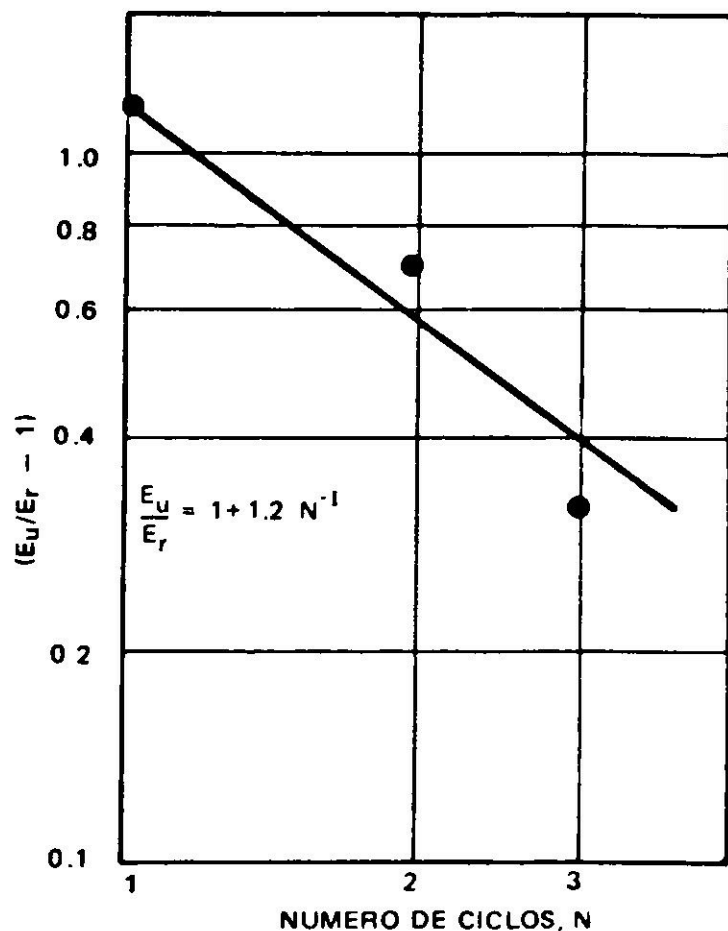


Fig. 8. Razón entre el módulo de descarga y recarga en función del número de ciclos en pumicita.

Actualmente, IDIEM desarrolla un proyecto de investigación destinado a evaluar la función de compactación o densificación en suelos granulares sometidos a cargas sísmicas (cíclicas). Para tal efecto se ha implementado un foso de prueba en cuyo interior se deposita suelo granular en condiciones de compactación controlada, el que es sometido a ensayos presiométricos con aplicación de deformaciones cíclicas de amplitud controlada. Estos ensayos se plantean con el fin de ajustar sus resultados con los obtenidos mediante ensayos de laboratorio de corte simple con aplicación de deformaciones cíclicas de amplitud controlada. De este modo se pretende obtener un coeficiente empírico que permita transformar los resultados de los ensayos presiométricos a una función apta para representar la ley de compactación de un depósito granular en condición geostática sometido a un sismo<sup>5</sup>.

#### Determinación del coeficiente de estructura

El cálculo del asentamiento de fundaciones utilizando la teoría presiométrica, y por consiguiente la estimación de su constante de balasto, depende de un coeficiente empírico denominado coeficiente de estructura,  $\alpha$ .

La Fig. 9 grafica algunas correlaciones entre los módulos presiométricos,  $E_m$ , y los obtenidos en laboratorio mediante ensayos triaxiales de compresión en carga,  $E_t$ . Del análisis de dicha figura se constata que los valores de  $E_m$  son sistemáticamente menores que los módulos determinados en ensayos triaxiales. Ello se debe principalmente a que la trayectoria de tensiones, que es un factor relevante en el comportamiento del suelo, en los ensayos presiométricos difiere

consolidadas se han obtenido valores de  $K_o$  promedios iguales a  $0.57 \pm 0.08$  y  $0.51 \pm 0.13$  respectivamente<sup>1</sup>.

## Determinación de módulos presiométricos estáticos y cíclicos

### Módulo estático

El módulo presiométrico estático,  $E_m$ , es medido en un campo de tensiones desviador, siendo proporcional a la pendiente de la curva presiométrica en la fase pseudo elástica (trazo AB en Fig. 3). La Fig. 4 muestra determinaciones de  $E_m$  en función de la profundidad para arenas. Esta posibilidad de poder contar con un perfilaje del módulo de deformación hace que el método sea uno de los más indicados para el estudio de deformaciones en fundaciones superficiales y, muy especialmente, en fundaciones profundas.

### Módulo dinámico

Los ensayos presiométricos se realizan normalmente hasta alcanzar la presión límite. Sin embargo, es posible realizar ensayos con ciclos de carga y descarga orientados al estudio del comportamiento del suelo sometido a cargas cíclicas. Esta nueva modalidad del ensayo presiométrico permite determinar los módulos de deformación en cada ciclo empleando el mismo principio de cálculo utilizado para los módulos presiométricos estáticos.

En la Fig. 6 se define el módulo secante cíclico,  $E_s$ , los módulos en descarga  $E_u$ , y en carga,  $E_r$ , y la deformación plástica,  $\epsilon_p$ , correspondiente a resultados de un ensayo cíclico realizado en pumicita en la Planta Experimental de IDIEM en Cerrillos. En dicha figura el término  $V_o$  se ha definido convencionalmente como  $V_c + v_o$  siendo  $v_o$  el volumen inyectado para alcanzar el punto 0 de la curva y  $V_c$  el volumen inicial de la cavidad. El resto de los términos se definen como:

$$v_p = v_B - v_o \text{ (1}^{\text{er}} \text{ ciclo)}, \quad v_p = v_D - v_o \text{ (2}^{\text{o}} \text{ ciclo)} \dots; \quad V_s = V_c + 0.5(v_B + v_A);$$

$$V_u = V_c + 0.5(v_C + v_B); \quad \text{y} \quad V_r = V_c + 0.5(v_D + v_C).$$

La Fig. 7 muestra la variación de  $E_s$  y  $\epsilon_p$  en función del número de ciclos, destacándose la linealidad de estos dos parámetros en coordenadas semilogarítmicas. Estos resultados podrían constituir una potencial aplicación de los ensayos presiométricos a problemas de cargas laterales cíclicas en pilotes, deformaciones permanentes de pavimentos bajo tráfico pesado y a otros problemas propios de dinámica de suelos.

Diversas investigaciones<sup>3,4</sup> postulan que la razón entre el módulo de descarga  $E_u$  y el de recarga  $E_r$  se relacionan en el ciclo  $N$  según  $(E_u/E_r) = 1 + \beta N^{-n}$  donde  $\beta$  y  $n$  son parámetros característicos del suelo ensayado. En la Fig. 8 se presenta la variación de  $(E_u/E_r) - 1$  versus el número de ciclos, resultando valores de  $\beta$  y  $n$  iguales a 1.2 y 1.0 respectivamente. Estos valores están dentro de los rangos obtenidos en estudios anteriores, donde  $n$  varía entre 0.3 y 1 con un valor

promedio de 0.7 y  $\beta$  entre 0.0075 y 3.0 con un promedio de 0.58.

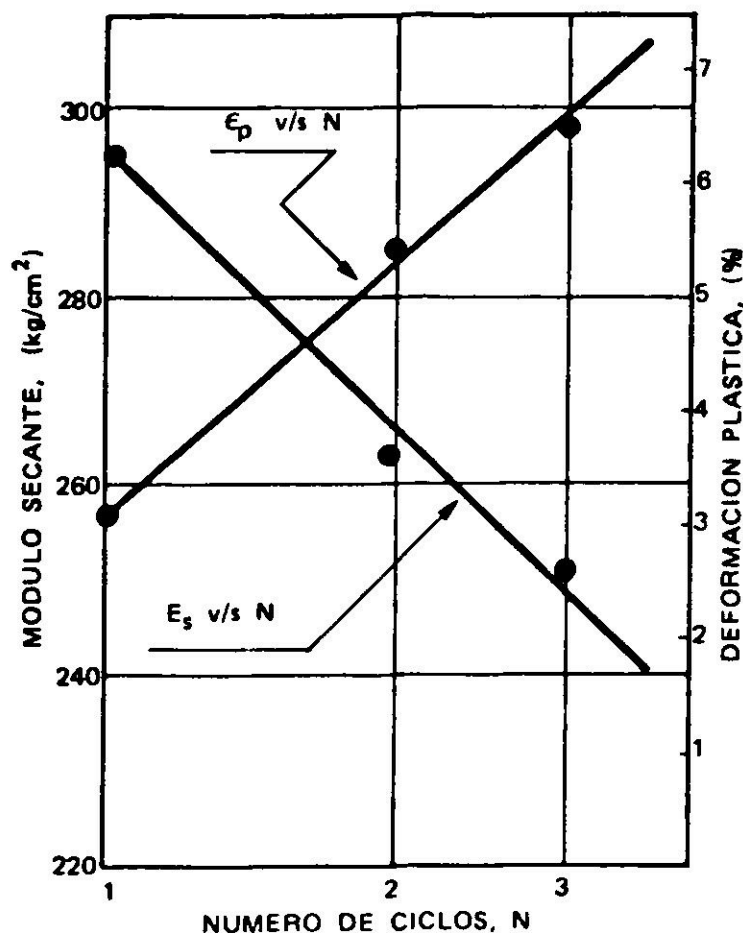


Fig. 7. Módulo secante cíclico y deformación plástica en función del número de ciclos en pumicita.

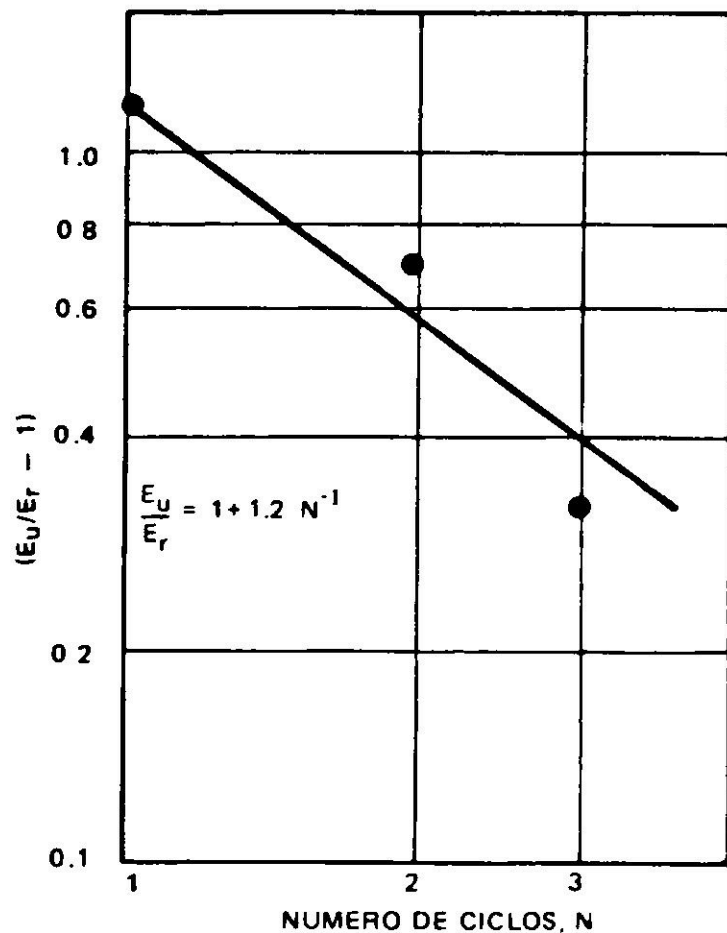


Fig. 8. Razón entre el módulo de descarga y recarga en función del número de ciclos en pumicita.

Actualmente, IDIEM desarrolla un proyecto de investigación destinado a evaluar la función de compactación o densificación en suelos granulares sometidos a cargas sísmicas (cíclicas). Para tal efecto se ha implementado un foso de prueba en cuyo interior se deposita suelo granular en condiciones de compactación controlada, el que es sometido a ensayos presiométricos con aplicación de deformaciones cíclicas de amplitud controlada. Estos ensayos se plantean con el fin de ajustar sus resultados con los obtenidos mediante ensayos de laboratorio de corte simple con aplicación de deformaciones cíclicas de amplitud controlada. De este modo se pretende obtener un coeficiente empírico que permita transformar los resultados de los ensayos presiométricos a una función apta para representar la ley de compactación de un depósito granular en condición geostática sometido a un sismo<sup>5</sup>.

#### Determinación del coeficiente de estructura

El cálculo del asentamiento de fundaciones utilizando la teoría presiométrica, y por consiguiente la estimación de su constante de balasto, depende de un coeficiente empírico denominado coeficiente de estructura,  $\alpha$ .

La Fig. 9 grafica algunas correlaciones entre los módulos presiométricos,  $E_m$ , y los obtenidos en laboratorio mediante ensayos triaxiales de compresión en carga,  $E_t$ . Del análisis de dicha figura se constata que los valores de  $E_m$  son sistemáticamente menores que los módulos determinados en ensayos triaxiales. Ello se debe principalmente a que la trayectoria de tensiones, que es un factor relevante en el comportamiento del suelo, en los ensayos presiométricos difiere



notablemente de la correspondiente a los triaxiales de compresión en carga clásicos. En un ensaye presiométrico se tiende a crear un campo de tensiones desviatorio puro, de tal forma que al aumentar las tensiones radiales (carga) las tensiones tangenciales disminuyen en igual proporción (descarga), revelando que el comportamiento del suelo no corresponde al de un cuerpo perfectamente elástico<sup>6,7</sup>.

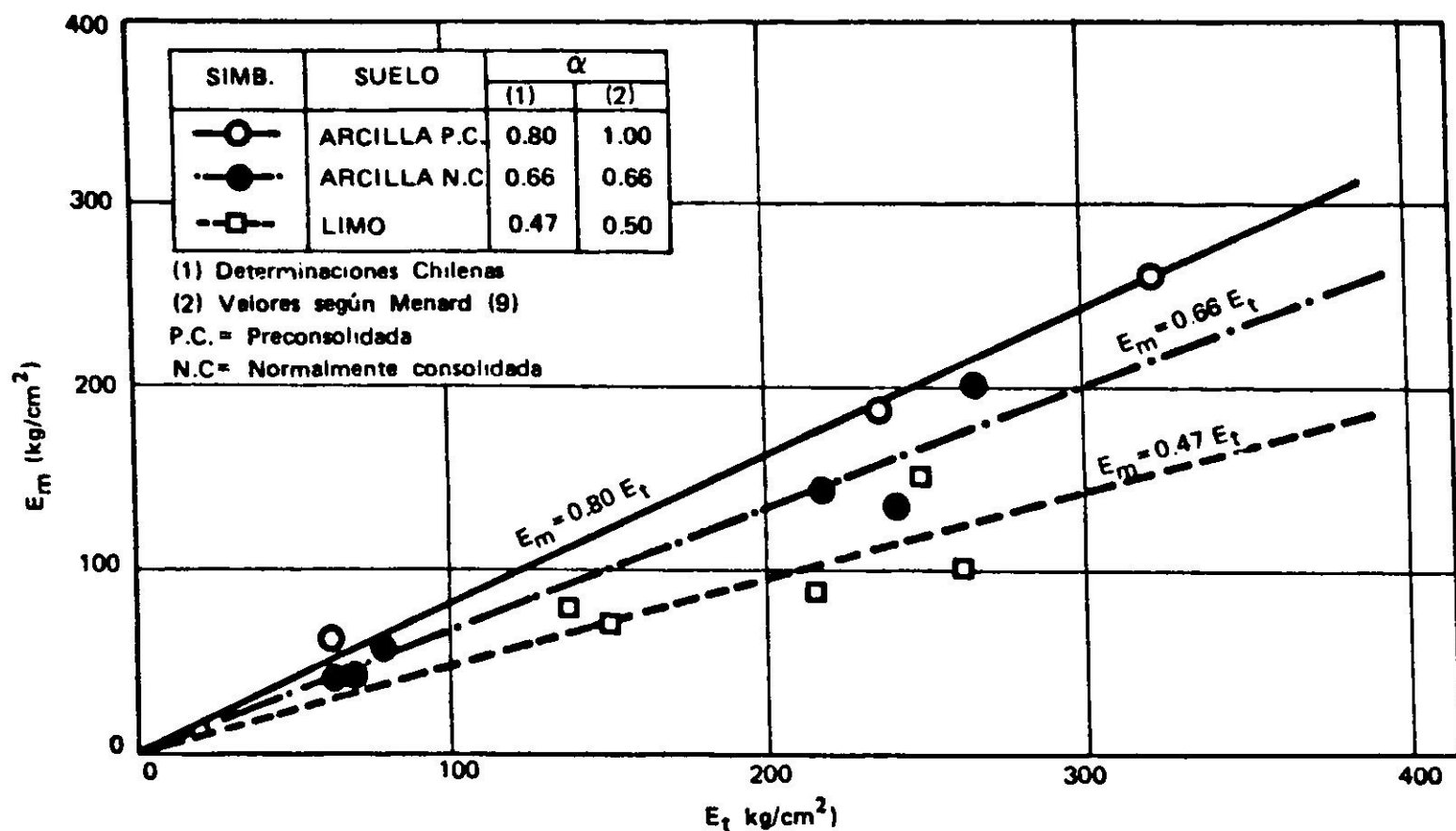


Fig. 9. Relación entre el módulo presiométrico y el módulo de deformación de ensayos triaxiales de compresión en carga.

De acuerdo a lo anterior y considerando los efectos de la desigualdad entre los módulos de deformación del suelo en carga y descarga, el Centro de Estudios Geotécnicos de París<sup>8</sup> propone una relación empírica entre  $E_m$  y el módulo de Young, del tipo  $E = (E_m / \alpha)$  en que  $\alpha$  corresponde al coeficiente de estructura.

En la Tabla I se entregan valores de  $\alpha$  determinados en base a experiencias chilenas, apreciándose una gran similitud con los valores propuestos por Menard<sup>9</sup>.

TABLA I

COEFICIENTE DE ESTRUCTURA EN FUNCION DEL TIPO DE SUELO

Tipo de suelo	Arcilla		Limo		Arena		Arena y grava	
	$E_m/p_l$	$\alpha$	$E_m/p_l$	$\alpha$	$E_m/p_l$	$\alpha$	$E_m/p_l$	$\alpha$
Preconsolidado	> 16	1 0.80*	> 14	0.667	> 12	0.50	> 10	0.33
Normalmente consolidado	9 - 16	0.667 0.66*	8 - 14	0.50 0.47*	7 - 12	0.33	6 - 10	0.25
Alterado y/o remodelado	7 - 9	0.50	> 8	0.50	> 7	0.33	> 6	0.25

\* Determinaciones realizadas en Chile.



## FUNDACIONES CARGADAS LATERALMENTE

## Determinación de la constante de balasto

La interacción lateral suelo-estructura en sistemas tales como cepas, pilotes y otros, normalmente se modela utilizando el concepto de constante de balasto,  $K$ . La determinación de este parámetro con las técnicas presiométricas, debido a la similitud entre el comportamiento del suelo alrededor de la cavidad del sondaje y el mecanismo de interacción suelo-estructura de dichos sistemas, se realiza basándose en la teoría de Menard, a través de la siguiente relación:

$$K = \frac{3E_m}{0.67 R \lambda' \alpha + 1.33 R_0 \left(\frac{\lambda R}{R_0}\right)^\alpha} \quad 1$$

$E_m$  = Módulo de deformación presiométrico

$R$  = Radio o semi ancho de la fundación

$R_0$  = Radio o semi ancho de referencia (igual a 30 cm)

$\alpha$  = Coeficiente de estructura del suelo (Tabla I)

$\lambda$  y  $\lambda'$  = Coeficiente de forma (Tabla II)

TABLA II

COEFICIENTE DE FORMA  $\lambda$  Y  $\lambda'$  EN FUNCION DEL TIPO DE FUNDACION

$L/2R$	1		2	3	5	20
	Circular	Cuadrada				
$\lambda$	1	1.12	1.53	1.78	2.14	2.65
$\lambda'$	1	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50

$L$  = Longitud del elemento que interacciona con el suelo.

$2R$  = Ancho o diametro del elemento que interacciona con el suelo.

En pilotes largos, donde la razón profundidad de enterramiento  $L$  y diámetro  $2R$  de la fundación es mayor que 20, la relación anterior se transforma en:

$$K = \frac{3E_m}{\alpha R + 1.33 R_0 \left(2.65 \frac{R}{R_0}\right)^\alpha} \quad 2$$

Para el caso de tuberías enterradas y de revestimiento de túneles no hay proposiciones explícitas establecidas por Menard. En opinión de los autores, el problema de interacción suelo-estructura para este tipo de sistemas presenta una gran similitud con el mecanismo que opera durante un ensaye presiométrico. Por tal motivo, se propone la siguiente relación para estimar la constante de balasto a utilizar en dichos sistemas:

$$K \approx \frac{E_m}{(1 + \nu)R}$$

3

en que  $\nu$  representa el módulo de Poisson del suelo que rodea la tubería o el revestimiento del túnel y  $R$  el radio del tubo o del revestimiento. Cabe señalar sin embargo, que en el caso de tuberías enterradas, éstas normalmente se alojan en zanjas, disponiéndose un relleno compactado en su entorno. Por tal motivo, el suelo que rodea el manto del tubo está constituido por dos medios con valores de  $E_m$  diferentes. Esta situación obliga a utilizar la relación (3) con cierta cautela, especialmente cuando el espesor del relleno en los costados de la tubería corresponde a un porcentaje importante del radio de dicha tubería.

Desde la implementación del presiómetro de IDIEM se han obtenido, para diferentes tipos de suelos chilenos, numerosas relaciones de  $K$  versus profundidad. Las Figs. 10 y 11 grafican dichas variaciones en una arcilla y en una arena limosa de baja compactación, las que se comparan con las obtenidas mediante otros procedimientos de estimación de la constante de balasto. Para determinar los valores de  $K$  a partir de los ensayos presiométricos en la arcilla se utilizó la relación (1), considerando un pilote hormigonado in situ con un diámetro  $D = 30.5$  cm y una longitud de enterramiento  $L = 8$  m. Se eligió este tipo de fundación, ya que posteriormente se efectuó una prueba de carga horizontal en un pilote con

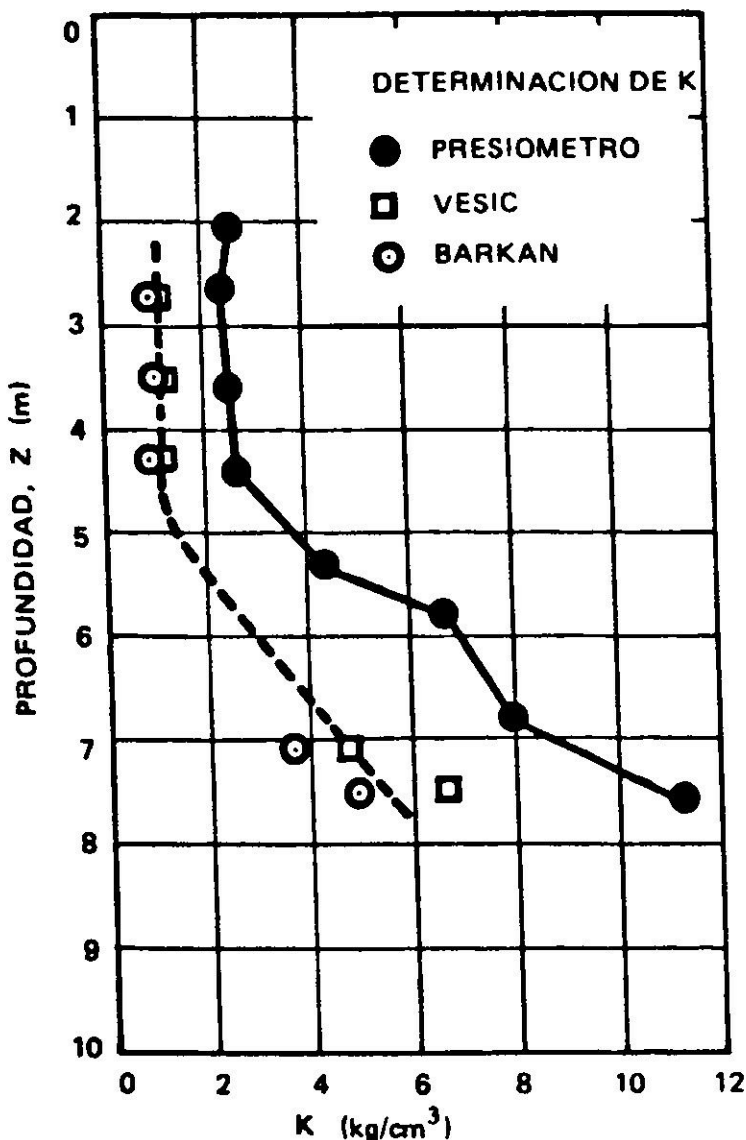


Fig. 10. Constante de balasto en arcilla para pilote de diámetro 30.5 cm y de 8 m de longitud

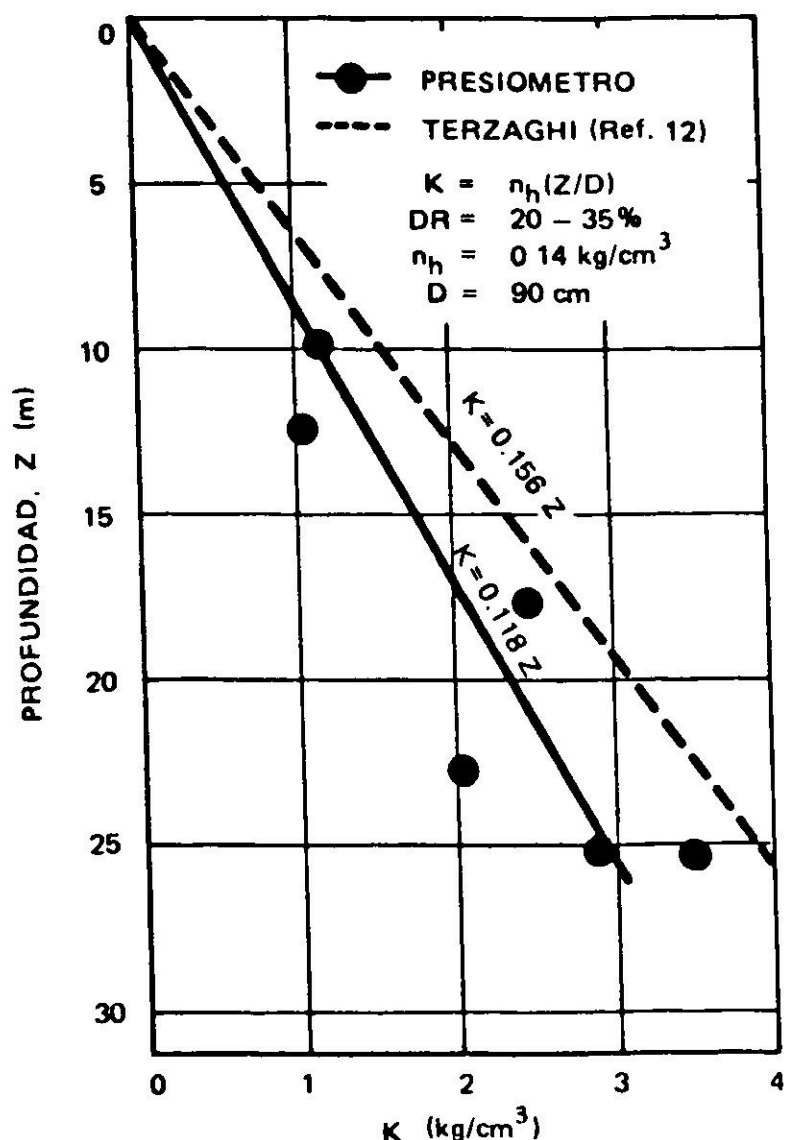


Fig. 11. Constante de balasto en arena limosa suelta para pilote de diámetro 90 cm y 26 m de longitud.

estas características geométricas, el cual se hormigonó in situ en la misma arcilla donde se realizaron los ensayos presiométricos.

Los valores de  $E_m$  presentes en la relación (1) correspondieron a los medidos con el presiómetro a las distintas profundidades de ensayo, con lo cual, para cada profundidad de ensayo, se obtuvo el correspondiente valor de la constante de balasto. Los resultados obtenidos mediante las relaciones de Vesic<sup>10</sup> y Barkan<sup>11</sup> se determinaron utilizando un módulo de deformación de la arcilla definido mediante ensayos triaxiales, en los cuales la presión de confinamiento isotrópica inicial correspondió a la tensión horizontal in situ en régimen geostático. Para la arena limosa de baja compacidad los valores de  $K$ , definidos a partir de los ensayos presiométricos, corresponden a los obtenidos mediante la relación (1) considerando un pilote de 90 cm de diámetro y 26 m de longitud. A modo de comparación se incluye la variación de la constante de balasto obtenida con la formulación de Terzaghi<sup>12</sup>, en la cual se consideró  $n_h = 0.14 \text{ kg/cm}^3$  correspondiente a arena suelta.

La Fig. 10 muestra que la estimación de la constante de balasto para el pilote en arcilla mediante las mediciones presiométricas, arroja resultados 100% mayores a los obtenidos con las relaciones de Vesic<sup>10</sup> y de Barkan<sup>11</sup> a base de ensayos triaxiales. Para la arena limosa suelta la correspondencia de resultados presiométricos con los formulados mediante la relación de Terzaghi es bastante aceptable.

### Interpretación de los resultados

El análisis de pilotes solicitados lateralmente se realiza normalmente modelándolos como vigas apoyadas sobre un medio winkleriano con una rigidez representada por la constante de balasto  $K$  del suelo. Si el pilote es flexible ( $\lambda L > \pi$ ), el desplazamiento lateral en la cabeza del pilote queda dado por:

$$Y_0 = 2\lambda \frac{H_0}{KD} \quad 4$$

siendo:

$Y_0$  = Desplazamiento lateral en la cabeza del pilote (pilote cabeza libre)

$H_0$  = Solicitación horizontal en la cabeza del pilote

$D$  = Diámetro del pilote

$K$  = Constante de balasto del suelo que embebe al pilote

$\lambda$  = Longitud elástica igual a  $\sqrt[4]{(KD/4E_p I_p)}$

$E_p$  = Módulo de elasticidad del pilote

$I_p$  = Momento de inercia de la sección transversal del pilote

$L$  = Longitud de enterramiento del pilote

Paralelamente a los ensayos presiométricos realizados para obtener la variación de  $K$  con la profundidad, Fig. 10, se realizó una prueba de carga horizontal estática y cíclica sobre un pilote tipo Prepakt hormigonado in situ, diámetro  $D = 30.5 \text{ cm}$ , longitud de enterramiento  $L = 8 \text{ m}$  y módulo de elasticidad  $E_p = 3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ . Considerando una constante de balasto presiométrica

$K = 2.6 \text{ kg/cm}^3$  correspondiente a los primeros 5 m de profundidad, se obtiene  $(\lambda L)_{L=5 \text{ m}} \approx \pi$ , lo que significa que el pilote es flexible y, que para efectos prácticos, solo los primeros 5 m de suelo son los que realmente contribuyen a dar restricción a los desplazamientos laterales. Reemplazando entonces los valores correspondientes en la ecuación (4), el desplazamiento lateral de la cabeza del pilote resulta igual a:

$$Y_0 = 0.15 H_0 \text{ en (cm) si } H_0 \text{ en (t)} \quad 5a$$

Si se adoptara el coeficiente de balasto  $K = 1.3 \text{ kg/cm}^3$  correspondiente a los primeros 5 m según la aproximación de Barkan y Vesic se tendría la siguiente relación para el desplazamiento lateral:

$$Y_0 = 0.26 H_0 \text{ en (cm) si } H_0 \text{ en (t)} \quad 5b$$

En la Fig. 12 se presentan los resultados obtenidos con la prueba de carga, los correspondientes a la aproximación presiométrica (ec. 5a) y los entregados por Vesic-Barkan a partir de ensayos triaxiales (ec. 5b). Se puede concluir que si bien la aproximación presiométrica sobrestima los desplazamientos laterales para  $H_0 < 6 \text{ t}$ , los valores obtenidos con ella resultan más cercanos a los resultados de la prueba de carga que los suministrados por ensayos de laboratorio (triaxiales).

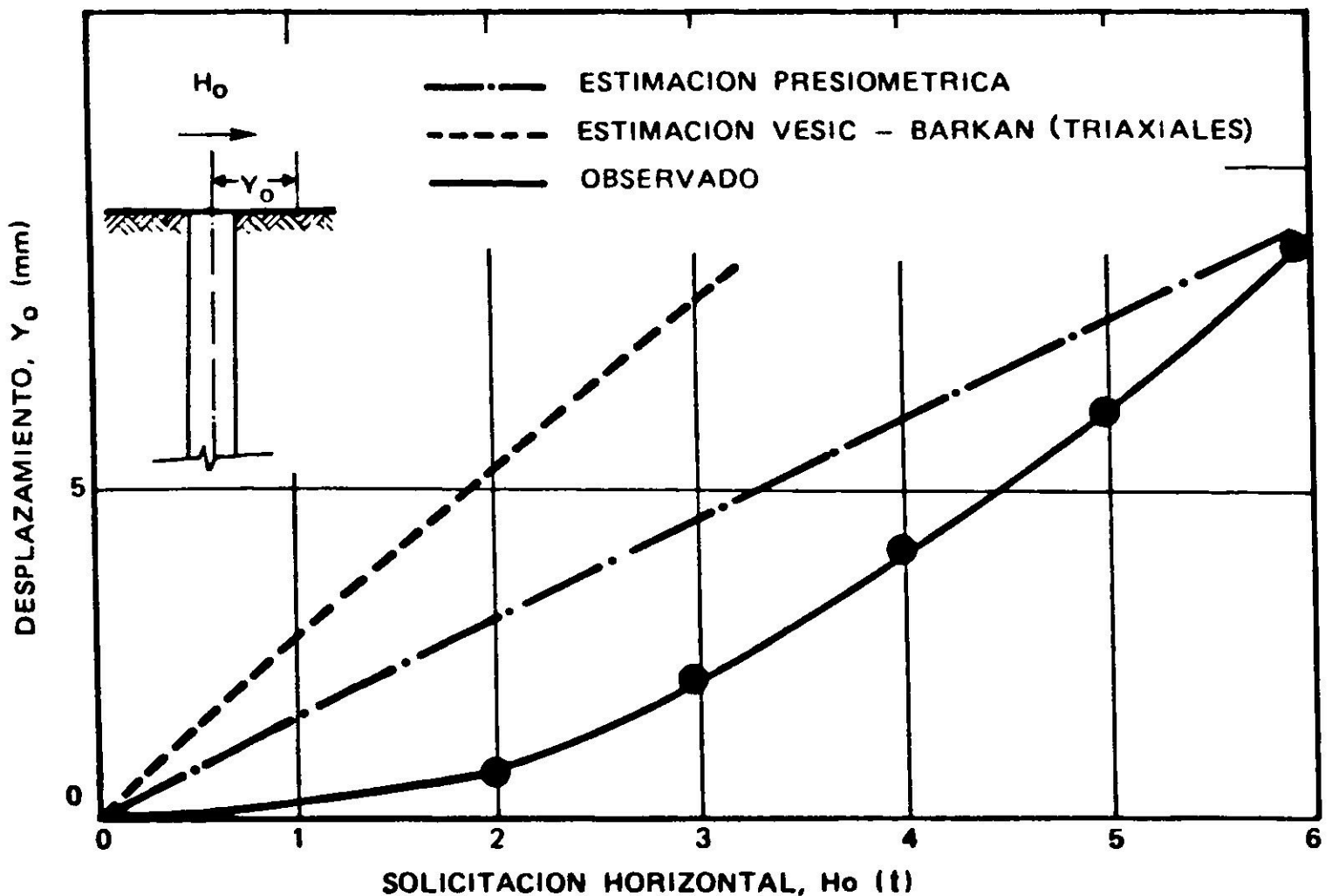


Fig. 12. Desplazamiento lateral de la cabeza del pilote en función de la sollicitación horizontal  $H_0$ . Pilote con cabeza libre en arcilla.

## COMENTARIOS FINALES

Debido a que el ensayo presiométrico consiste en expandir una cavidad cilíndrica mediante sollicitaciones radiales, una de sus principales aplicaciones se relaciona con el análisis de fundaciones profundas sollicitadas lateralmente. Mediante estos ensayos se puede determinar tanto la presión geostática horizontal,  $p_{oh}$ , como la constante de balasto lateral del suelo. Ambos parámetros intervienen en forma directa y/o indirecta en el diseño eficiente de obras marítimas, represas, puentes y otras obras civiles en donde las sollicitaciones laterales son relevantes.

Los valores de  $p_{oh}$  y por ende los del coeficiente de empuje en reposo,  $K_0$ , presentan dispersiones debido a que se obtienen directamente de las curvas presiométricas (punto A en Fig. 3). No siempre este punto se refleja en forma nítida en dicha curva, debido, principalmente, a la presencia de un anillo perturbado ubicado alrededor de la cavidad. Este anillo afecta notoriamente el inicio de la curva presiométrica entregando valores de  $p_{oh}$  mayores que los reales. Estas limitaciones se están corrigiendo mediante unas adaptaciones del equipo, de modo de restablecer el estado tensional natural del suelo, minimizando así el efecto de la presencia del anillo de suelo perturbado.

Las estimaciones presiométricas de la constante de balasto del suelo en profundidad facilitan la predicción de su comportamiento bajo la acción de cargas inducidas por la fundación. Para el caso específico de pilotes, existen, además de la experiencia presentada en este trabajo, numerosas comprobaciones empíricas que demuestran la bondad de la aproximación presiométrica frente a otros métodos basados en ensayos triaxiales.

Los ensayos presiométricos generalmente se realizan en forma estática hasta alcanzar la presión límite. Sin embargo antes de alcanzar dicha presión, es posible someter el suelo a sollicitaciones cíclicas. A la fecha este tipo de aplicación del presiómetro se encuentra en estado embrionario, siendo muy escasa la información al respecto existente en la literatura. Considerando que las técnicas presiométricas corresponden a determinaciones in situ, su implementación al campo de la dinámica de suelos es de gran importancia, ya que con ello se obtendrían parámetros más confiables relativos al comportamiento del suelo bajo cargas cíclicas. A ese respecto, los resultados con carga cíclica presentados en este trabajo constituyen un primer intento para abordar este tipo de problemas. Por otra parte, el proyecto que actualmente desarrolla el IDIEM, relativo a la obtención de funciones de compactación por cargas cíclicas mediante el presiómetro, constituiría un aporte a la solución de los problemas de densificación y licuefacción de suelos durante sismos.

## BIBLIOGRAFIA

1. VERA, P. *Determinación de propiedades in situ: Aplicación al estudio de fundaciones profundas*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias F1-



- sicas y Matemáticas, Universidad de Chile, (en desarrollo).
2. WROTH, C.P. In situ measurement of initial stresses and deformation characteristics, *Proceedings of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, A.S.C.E.,* Rayleigh, vol. 1, pp. 181–227, 1975.
  3. BRIAUD, J.L., LYTTON, R.L. y HUNG, J.T. Obtaining moduli from cyclic pressuremeter tests. *Journal of the Geotechnical Division, ASCE*, vol. 109, 1983, pp. 657–665.
  4. EDRIS, E.V. y LYTTON, R.L. Climatic material characterization of fine-grained soils, *Transportation Research Record* 642, T.R.B. Washington D.C., pp. 39–44, 1977.
  5. ORTIGOSA, P., ACEVEDO, P. y MUSANTE, H. *Determinación de la función de compactación en suelos granulares durante sismos mediante el presiómetro* (inédito).
  6. PINTO, P. *Utilización del presiómetro en la determinación de las propiedades geomecánicas: Aplicación al cálculo de capacidades de soporte y asentamientos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1981.
  7. CASSAN, M. *Los ensayos in situ en la Mecánica del Suelo. Su ejecución e interpretación*. Tomo I, Editores Técnicos Asociados S.A. 1982.
  8. BAGUELIN, F., JEZEQUEL, J.F. y SHIELDS, D.D. *The pressuremeter and foundation engineering*, Serie on Rock and Soil Mechanics, Ed. Trans. Tech. Publication, 1978.
  9. CENTRE D'ETUDES MENARD. *Regles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'Exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondations*, Publication D/60/75.
  10. VESIC, A.S. *Design of pile foundations*, Transportation Research Board, 1977.
  11. BARKAN, D.D. *Dynamics of bases and foundations*. Ed. Mc Graw-Hill, 1962.
  12. TERZAGHI, K. Evaluations of coefficients of subgrade reaction, *Geotechnique*, vol. 5, n° 4, 1955.

## SUMMARY

*First results obtained in Chile with pressuremeter techniques on fine and granular soil deposits are presented. Among them, at rest pressure coefficients, static and cyclic soil moduli, structural coefficients and moduli of subgrade reaction are included. Results are compared with those obtained through laboratory tests and horizontal pile loading tests. It is pointed out the advantages of using pressuremeter techniques for in situ measurements of soil mechanical properties under both static and cyclic stress applications.*