

EL PENETROMETRO COMO INSTRUMENTO PARA EL ESTUDIO DE LOS TERRENOS

Por GONZALO NAVACERRADA FARIAS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Expone el autor unas ideas generales sobre los distintos tipos de penetrómetros utilizados en el reconocimiento de los terrenos. Después de considerar las variedades existentes según el proceso de hincas o las medidas realizadas, examina las distintas posibilidades de esta clase de aparatos para la identificación de las distintas capas que constituyen el terreno, el estudio de su resistencia y otras características.

Cuando se proyecta o se construye una obra, ya sea ésta sencilla o de características excepcionales, debe exigirse, cuando menos, que la obra presente condiciones de seguridad y condiciones económicas que permitan asegurar su rentabilidad. Esto requiere un estudio detallado de los planos y del proceso de ejecución, cuyo valor depende de la concordancia entre los datos que han servido de base al estudio y la realidad.

Una de las mayores dificultades se presenta al considerar el papel tan importante que representa el terreno natural y el desconocimiento que tenemos *a priori* sobre sus propiedades. El terreno interviene siempre, de una forma u otra; y entre todos los materiales que intervienen en las obras, no hay otro que presente mayores variaciones.

Muchas veces, por falta de previsión, se descuida el reconocimiento del terreno y cuando surge una dificultad inesperada es necesario interrumpir las obras, pedir apresuradamente los consejos de un especialista y modificar el proyecto sobre la marcha. El resultado, en el mejor de los casos, es un encarecimiento de la obra, un retraso en su ejecución y una solución forzada que dista bastante de ser la más idónea. No olvidemos que los estudios del terreno no deben servirnos para vencer una dificultad, sino para evitarla.

Entre las distintas técnicas que conocemos para el estudio y reconocimiento de los terrenos merece, sin duda alguna, asignar un lugar destacado a los sondeos con penetrómetro. Esta

técnica, que tuvo sus principios hacia 1930, se ha desarrollado extensamente en Europa a mediados de siglo, y hoy se utiliza cada vez más.

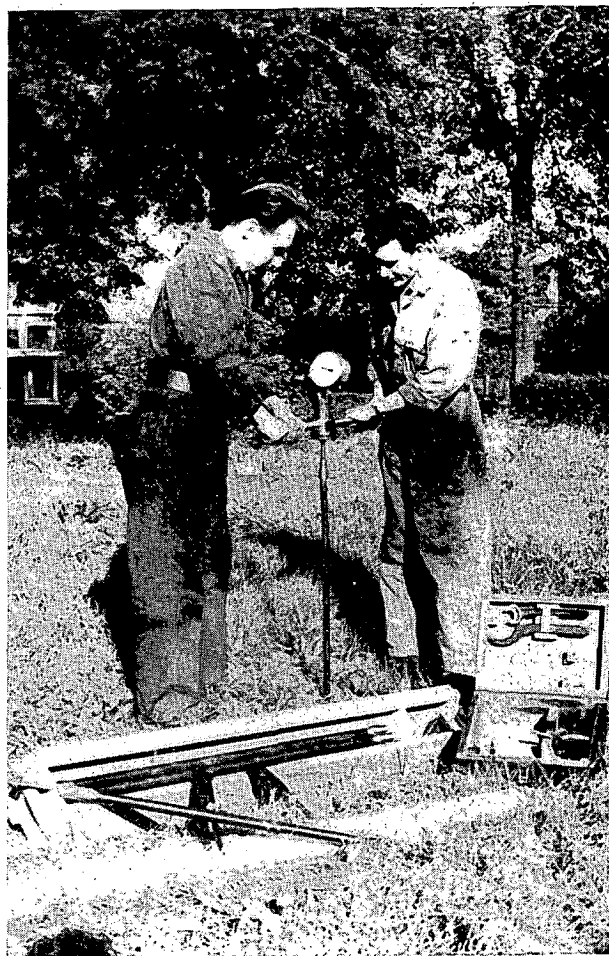


Fig. 1.^a — Penetrómetro estático ligero.

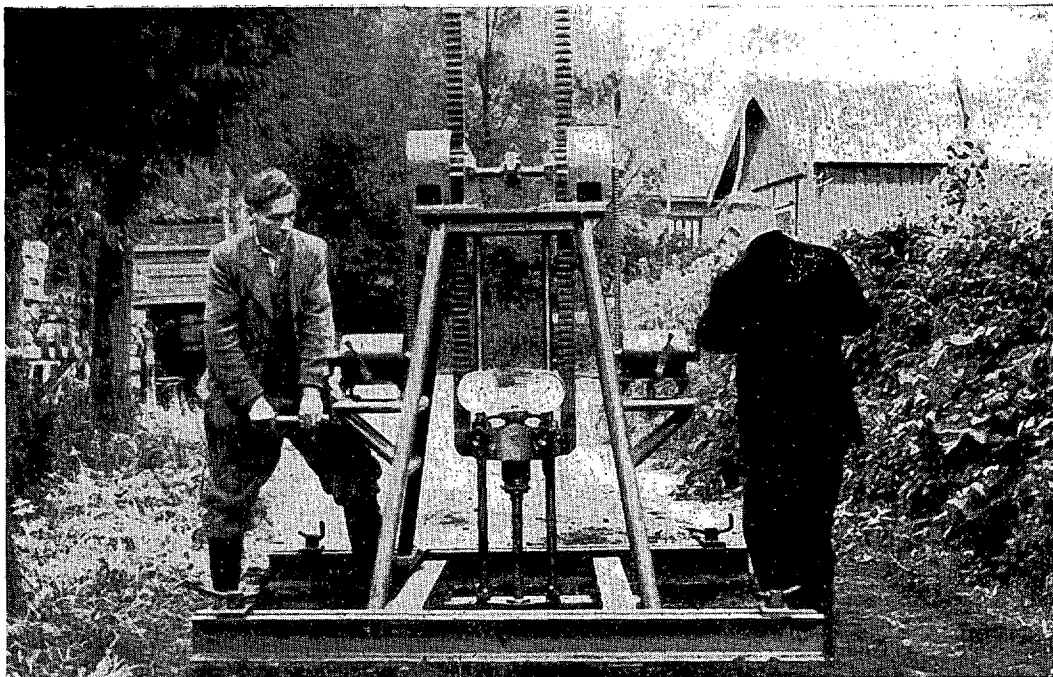


Fig. 2.^a — Penetrómetro estático de 10 Tn. (tipo holandés de accionamiento manual).

En esencia, el procedimiento consiste en hincar en el suelo una varilla metálica y medir la resistencia que ofrece el terreno a su penetración, a medida que aumenta la profundidad. De los datos así obtenidos pueden deducirse una serie de consecuencias, de gran valor, relativas a las características de las distintas capas atravesadas y a su capacidad de resistencia.

Debido al gran interés que tiene esta técnica, en el presente artículo nos proponemos hacer un resumen de los aspectos más importantes que presenta la utilización del penetrómetro para los estudios de reconocimiento en general, y especialmente en el caso del estudio de cimentaciones.

Fundamentalmente, en un penetrómetro podemos distinguir tres partes, bien diferenciadas:

- El equipo de hinka.
- El sistema de penetración.
- El dispositivo de medida.

El equipo de hinka puede ser dinámico (hinka a percusión), estático (hinka a presión o mediante sobrecargas), o mixto (posibilidad de utilizar uno u otro sistema de hinka según las circunstancias, a voluntad del operador).

La capacidad de los penetrómetros dinámicos se mide por la energía disponible para la hinka, lo que exige conocer el peso de la ma-

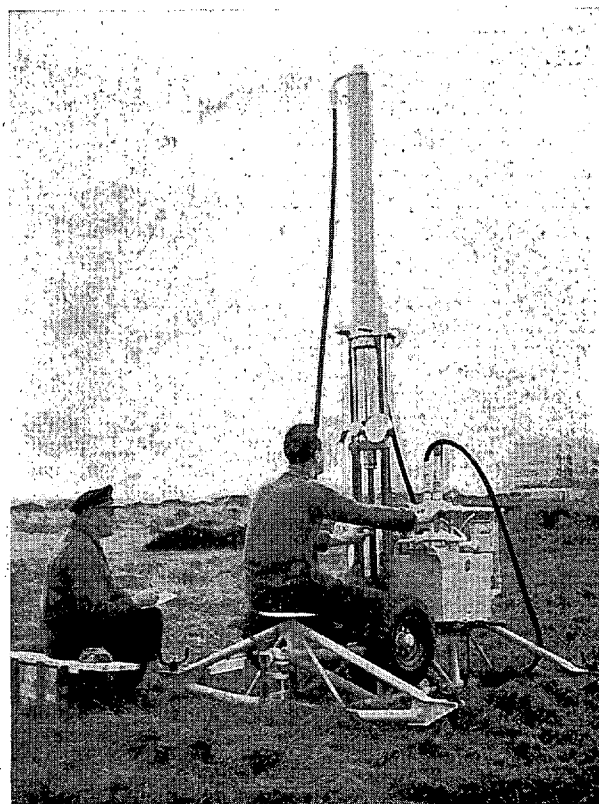


Fig. 3.^a — Penetrómetro estático de 10 Tn. (tipo holandés con motor).

za que golpea el varillaje, y su altura de caída (altura de caída libre). En los penetrómetros estáticos, por el contrario, suele considerarse el esfuerzo máximo aplicable al varillaje durante la hinca, para caracterizar la potencia del penetrómetro.

El sistema de penetración comprende el varillaje propiamente dicho, que en algunos casos va protegido por una entubación, y la punta.

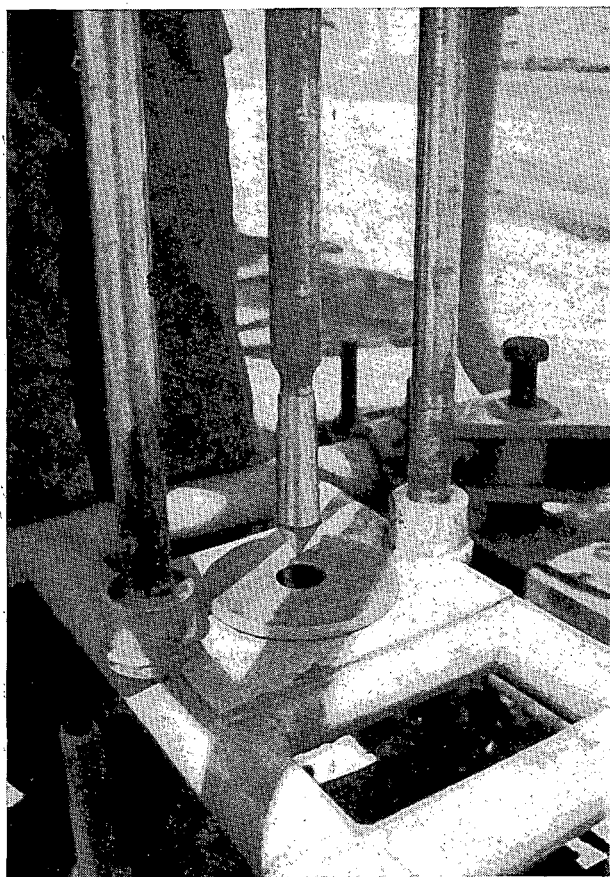


Fig. 4.a — Punta del penetrómetro holandés (ángulo del cono 60°; diámetro, 36 mm.).

Cuando no existe entubación, la resistencia que ofrece el terreno a la penetración resulta de la acción simultánea de la resistencia de punta y del rozamiento lateral del terreno sobre el varillaje. Por el contrario, cuando el varillaje se mueve dentro de una entubación, esos dos componentes actúan independientemente y pueden medirse por separado, según se actúe sobre el varillaje, al que va unida la punta, o sobre la entubación, cuya superficie lateral ab-

sorbe todo el esfuerzo de rozamiento con el terreno.

En cualquier caso, se comprende que la punta actúa como elemento de ataque y que, por tanto, de sus características dependerá fundamentalmente la resistencia que ofrezca el terreno a la penetración durante el proceso de hinca.

En los penetrómetros llamados estáticos, el dispositivo de medida puede ser mecánico, hidráulico o eléctrico; y la medida, continua o puntual, según se registre el valor de la resistencia a la penetración durante todo el proceso de hinca, de una manera continua, o solamente al alcanzar determinadas profundidades que corresponden a los puntos que se trata de estudiar. En este último caso, el proceso normal de hinca se interrumpe a esas profundidades para llevar a cabo la medida de la resistencia del terreno.

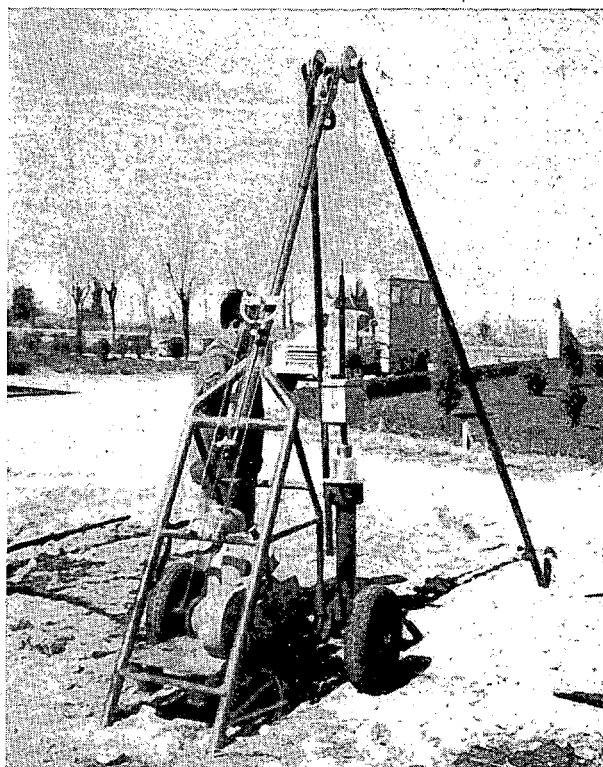


Fig. 5.a — Penetrómetro dinámico Borros.

En los casos más frecuentes, suelen utilizarse dispositivos de medida de tipo hidráulico acoplados, mediante sistemas más o menos ingeniosos, al circuito hidráulico del gato que pro-

duce el esfuerzo mecánico para la hincas. De esta forma, es posible llegar a obtener un registro continuo de la resistencia del terreno para cada profundidad durante el avance de la penetración a través de las distintas capas del terreno.

La resistencia del terreno puede medirse por el valor total del esfuerzo aplicado o, habida cuenta de las características de lo que hemos llamado *sistema de penetración*, calculando el

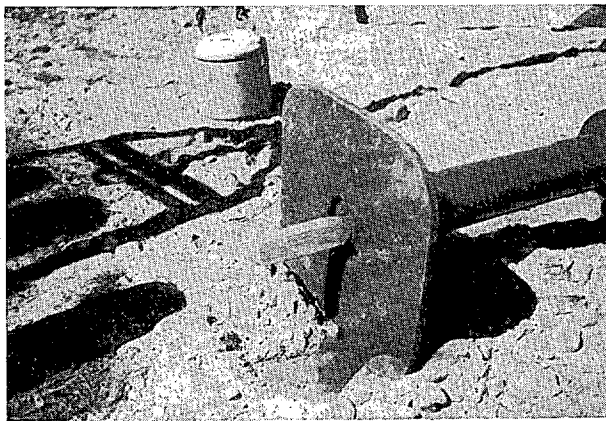


Fig. 6.a — Punta del penetrómetro dinámico Borros.

valor del esfuerzo por unidad de superficie. Esta superficie se refiere, naturalmente, al elemento que transmite el esfuerzo directamente al terreno, es decir, la punta o el fuste, según se trate de la resistencia en punta o la resistencia al rozamiento lateral.

En los penetrómetros dinámicos, una vez alcanzada la profundidad a la que se desea realizar el ensayo, suele medirse, para la energía de percusión aplicada, el número N de golpes necesarios para producir una determinada penetración de la punta, por ejemplo, 20 cm. El valor de N_{20} se obtiene, suponiendo que existe proporcionalidad entre el número de golpes y la penetración correspondiente, contando el número de golpes necesarios para producir un avance de unos cuantos centímetros en la penetración.

De esta forma se puede realizar el ensayo a diversas profundidades y obtener los valores de N_{20} correspondientes a cada una de las capas de terreno atravesadas.

Como consecuencia de todo esto, es fácil comprender que exista una gran variedad de modelos de penetrómetros según el sistema de

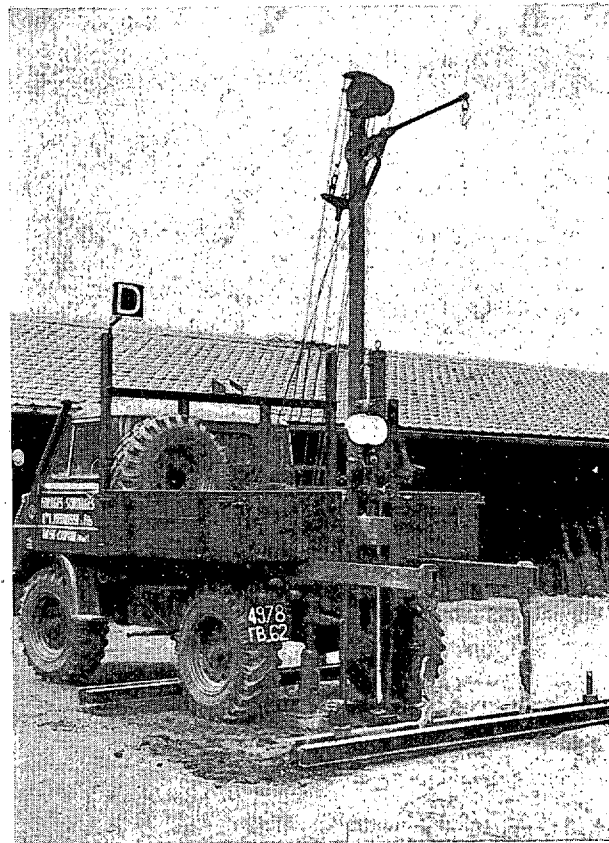


Fig. 7.a — Penetrómetro Meurisse (estático y dinámico, punta ϕ 45 mm.).

hincas, la potencia disponible, el tipo de varillaje, las características de la punta, el dispositivo de medida, etc. Algunos modelos disponen de adaptaciones especiales que permiten también la extracción de muestras de las distintas capas atravesadas. De esta forma pueden completarse los datos proporcionados por

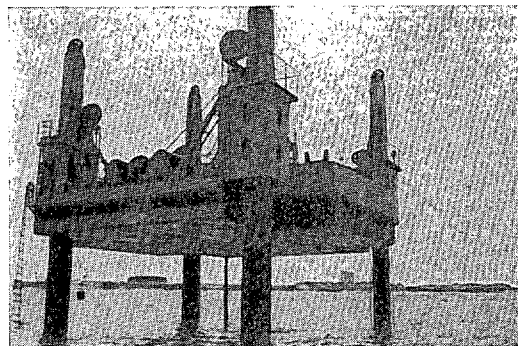


Fig. 8.a — Penetrómetro Meurisse montado sobre plataforma para trabajos marítimos.

el penetrómetro con los correspondientes ensayos de laboratorio.

También se comprende que esta gran variedad de modelos de penetrómetros haya sido la causa principal de las dificultades encontradas para la comparación, a escala internacional, de las teorías desarrolladas en los distintos países, y de los resultados obtenidos.

Buena prueba de ello es que en 1957 la Sociedad Internacional de Mecánica del Suelo creó una comisión para el estudio y normalización de los ensayos de penetración estáticos y dinámicos. Desde entonces, esta comisión ha desarrollado un trabajo importante, pero todavía queda por resolver gran cantidad de problemas,

tanto desde el punto de vista teórico como desde el punto de vista práctico y de interpretación de los datos proporcionados por los ensayos de penetración.

En general, como ya hemos indicado, la resistencia R medida con un penetrómetro resulta de la resistencia de punta R_p y la resistencia R_L debida al rozamiento lateral, de tal forma que se puede escribir:

$$R = R_p + R_L$$

En los casos sencillos se puede despreciar el valor del rozamiento lateral, o medirlo y considerarlo independientemente. En estos casos:

$$R = R_p$$

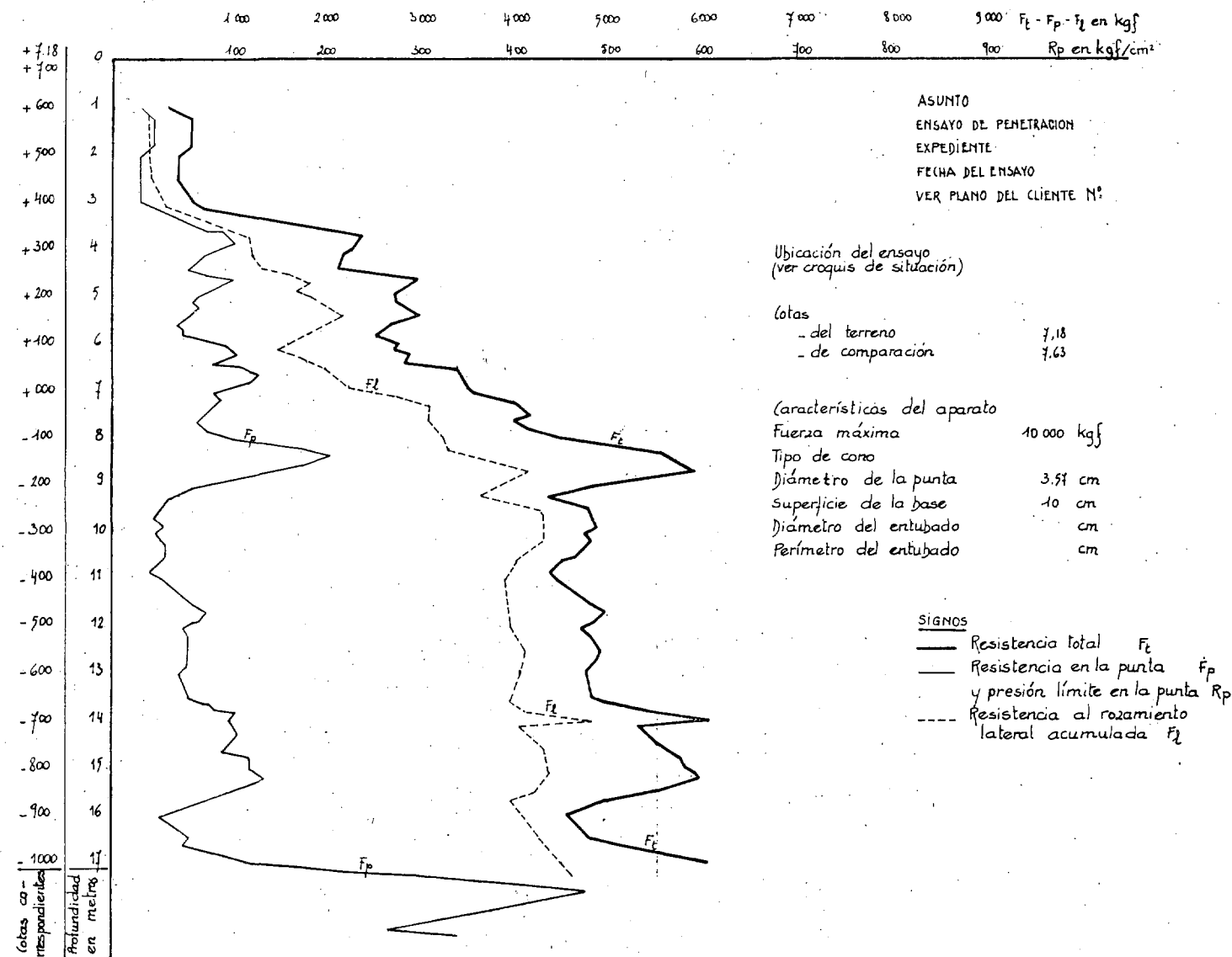


Fig. 9.^a — Gráfico de un sondeo de penetración.

Los valores obtenidos con el penetrómetro dan, en cualquier caso, lugar a un gráfico del tipo representado en la figura 9.^a. En ella se llevan en ordenadas (hacia abajo) las profundidades alcanzadas por la punta del penetrómetro, y en abscisas los valores de R (expresados en número de golpes para una penetración de 20 cm., o en unidades de fuerza o presión, según se trate de un penetrómetro dinámico o estático, respectivamente).

Observemos que, en cualquiera de estos casos, con objeto de facilitar la utilización posterior de posibles fórmulas o métodos de cálculo deducidos de las teorías de la mecánica del suelo, la resistencia puede expresarse en unidades de presión. Si el penetrómetro es de tipo estático y mide R_p , en unidades de fuerza, el conocimiento de las características geométricas de la punta permite, como ya hemos dicho, la transformación de una manera sencilla. Si, por el contrario, se trata de un penetrómetro dinámico, se puede hacer la transformación por medio de alguna de las fórmulas dinámicas utilizadas normalmente por los técnicos. Así, por ejemplo, la fórmula llamada "holandesa" presenta la forma:

$$R_p^v = k \frac{P_m^2 h}{(P_m + P_v) S d} \quad \text{siendo } N_{20} \cdot d = 20 \text{ (cm)}$$

y permite calcular la resistencia dinámica de punta R_p^v , en unidades de presión, a partir de los pesos P_m y P_v de la maza y del varillaje, de la altura h de caída de la maza, de la superficie S de la punta, y del valor de N_{20} (el factor k es un coeficiente dimensional). Debe también observarse, sin embargo, que los conceptos de resistencia estática y dinámica de punta, que corresponden respectivamente a los valores R_p y R_p^v , son físicamente diferentes; el primero correspondería, por ejemplo, a la presión límite en la punta de un pilote de cimentación en condiciones estáticas; el segundo, a la presión límite instantánea del mismo pilote durante la hinca. En la práctica ocurre con alguna frecuencia que, para un suelo determinado, la relación $r = \frac{R_p^v}{R_p}$ toma valores próximos a $r = 2$, cuando se utiliza la fórmula holandesa citada anteriormente.

El conocimiento de los valores de la resistencia de punta permite deducir importantes

consecuencias en cuanto a las características físicas y mecánicas de los estratos del terreno.

En primer lugar, cuando se hace penetrar el aparato en el terreno, existe una notable correspondencia entre los valores de la resistencia de punta que se van registrando y las capas atravesadas. La figura 10 es muy expresiva

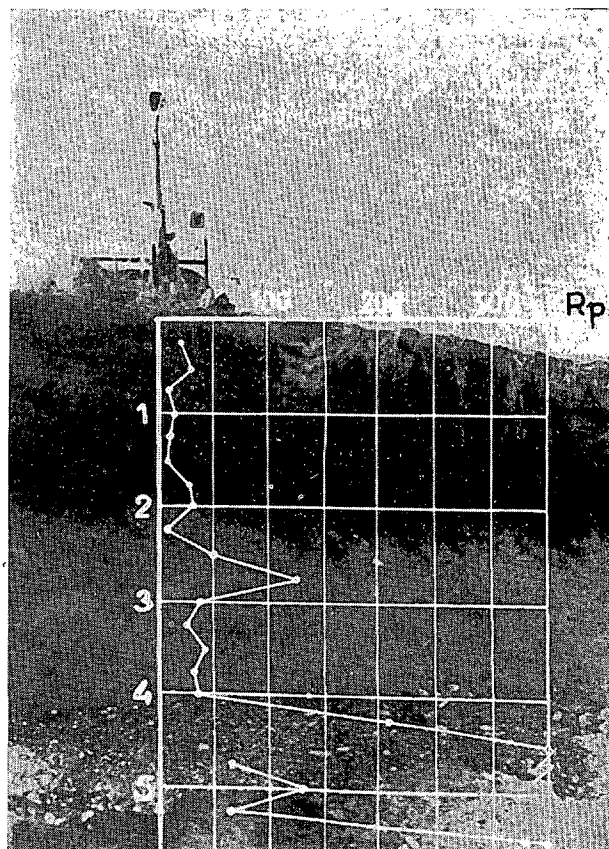


Fig. 10. — Concordancia entre el gráfico de penetración y el terreno atravesado.

a este respecto. En ella se han superpuesto la fotografía de un corte del terreno y el diagrama de penetración correspondiente, obtenido con un penetrómetro estático-dinámico tipo "Meurisse". Debajo de una capa de terreno vegetal de unos 2 metros aparece una arcilla arenosa (R_p comprendido entre 10 y 30 Kgf./cm.²) que presenta algún pequeño canto rodado entre los 2,75 y 3,50 m. de profundidad; a los 4 m. aparece una capa de grava de compacidad variable que impide el avance del penetrómetro estático a los 4,50 m. (R_p superior a 350 Kgf./cm.²); es necesario proseguir la penetración a percusión;

a los 4,75 m. la resistencia decrece bruscamente a valores del orden de los 100 Kgf./cm.², para alcanzar de nuevo la capacidad máxima del aparato a los 5,25 m., donde es necesario recurrir de nuevo a la percusión. Esta figura es un buen ejemplo de cómo el penetrómetro detecta la existencia de las distintas capas que componen el terreno.

En segundo lugar, el conocimiento de la resistencia de punta determinada en los ensayos con el penetrómetro permite calcular con cierta aproximación las características mecánicas c y φ de los suelos (cohesión y ángulo de rozamiento interno). Para ello puede utilizarse alguna de las fórmulas que dan la carga de hundimiento de una cimentación en función de dichas características. Así, por ejemplo, según la fórmula de "Prandtl-Caqnot" podemos escribir:

$$R_p = k \left\{ p_0 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) e^{\pi \operatorname{tg} \varphi} + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi} \left[\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) e^{\pi \operatorname{tg} \varphi} - 1 \right] \right\}$$

donde p_0 es la presión debida a las tierras situadas por encima del punto considerado y k es un parámetro función de las características geométricas de la punta del penetrómetro. En el caso más general, bastará conocer dos valores de R_p a distintas profundidades dentro de una misma capa homogénea del terreno, para que se pueda establecer un sistema de ecuaciones que permita determinar los valores de c y φ correspondientes. En ciertos casos particulares, por ejemplo cuando se trata de una capa granular en la que pueda suponerse *a priori* $c = 0$, el problema se simplifica notablemente, y es suficiente un valor de R_p para determinar el valor de φ .

En el caso de que se trate de estudiar una cimentación de tipo profundo, puede admitirse, dentro de ciertos límites y con una cierta aproximación, que el penetrómetro, habida cuenta de sus características geométricas, constituye un modelo reducido del pilote que ha de servir para la cimentación. De esta forma, la carga de hundimiento del pilote debido a su resistencia de punta puede deducirse de la del penetrómetro, por simple proporcionalidad, a partir de los valores de R_p .

Por otra parte, el penetrómetro permite determinar con precisión la profundidad de la capa resistente y, por tanto, la longitud de los pilotes.

Esto puede ser especialmente útil en el caso de pilotes prefabricados o de tablestacas, para evitar ciertas dificultades que se presenten en la obra, por falta de conocimiento suficiente de la capa resistente. Así, realizando los oportunos ensayos con el penetrómetro podrá determinarse la longitud exacta de cada pilote y, de esta forma, suprimir los empalmes de piezas cuya longitud resulta ser insuficiente para alcanzar la capa resistente, o los desmoches de las que resultan ser demasiado largas. Ambas operaciones son costosas y perturban el ritmo normal de la obra.

Desde otro punto de vista se ha observado, en determinados tipos de suelos, cierta correlación entre los valores de R_p y el coeficiente de compresibilidad. Son varios los técnicos que han realizado estudios en este sentido. En especial, Buisman ha logrado establecer relaciones particularmente sencillas, que pueden presentar un gran interés. Según esto, sería también posible calcular, con cierta aproximación, los asientos de las cimentaciones, a partir de los datos proporcionados por el penetrómetro.

La determinación simultánea de la resistencia de punta y del rozamiento lateral, todavía aumenta el campo de las posibilidades del aparato. La dificultad estriba en la medición del rozamiento con cierta precisión.

Si se mide el valor R_L del rozamiento lateral total ejercido por el terreno sobre la tubería, los valores obtenidos son poco representativos; se observa, en efecto, que el rozamiento que ejerce una determinada capa de suelo disminuye, a medida que la penetración va profundizándose, debido a las alteraciones del suelo como consecuencia de las manipulaciones de la tubería. Este fenómeno resulta ser incontrolado y, por tanto, es prácticamente imposible interpretar con alguna utilidad los gráficos que representan R_L en función de la profundidad.

Por esta razón suele preferirse la determinación del rozamiento en pequeñas secciones situadas en las proximidades de la punta, donde las manipulaciones de la tubería han alterado menos el suelo. Para ello se utilizan puntas de tipo especial, tal como la de la figura 11, que corresponde a un penetrómetro estático holandés. De esta forma pueden obtenerse los valores del rozamiento unitario correspondiente a cada capa, valores que pueden ser utilizados en diversos problemas, por ejemplo, en el

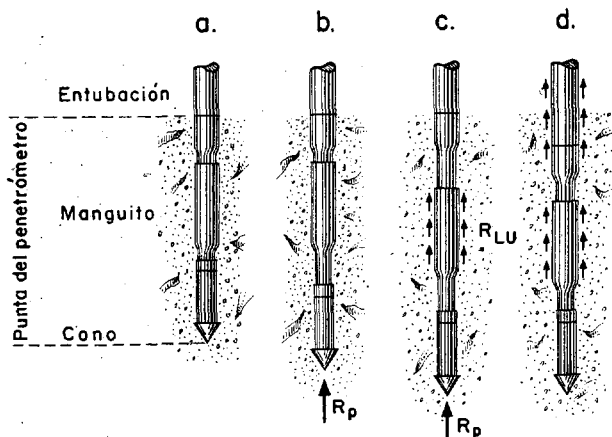


Fig. 11. — a) Posición inicial. b) Penetración del cono (se mide $R = R_p$). c) Penetración del cono y manguito (se mide $R = R_p + R_{LU}$). d) Penetración de la entubación hasta nueva posición inicial (no se hace medición).

cálculo de la resistencia de fuste de los pilotes de una cimentación.

Por último, el conocimiento simultáneo de la resistencia de punta y el rozamiento lateral

permite en cierto modo la identificación de una capa de suelo; se puede así evitar en muchos casos la necesidad de extraer muestras. Según Begeman pueden utilizarse para ello gráficos análogos al de la figura 12 que nos da el tipo de suelo y la proporción de partículas inferiores al tamaño 16μ , en función de la resistencia de punta y el rozamiento lateral unitario, ambos valores obtenidos con el penetrómetro estático.

Como puede verse, las posibilidades que ofrecen los sondeos de penetración son grandes, y distan mucho de estar agotadas. Continuamente se perfeccionan los penetrómetros existentes, se aumenta su precisión, y se amplía su campo de aplicación.

No parece que la técnica de la penetración esté destinada a sustituir a los clásicos sondeos de perforación utilizados en el reconocimiento de los terrenos, pero la gran rapidez de los sondeos de penetración y su coste notablemente inferior, son factores importantes que contribuyen a que se utilicen cada vez más.

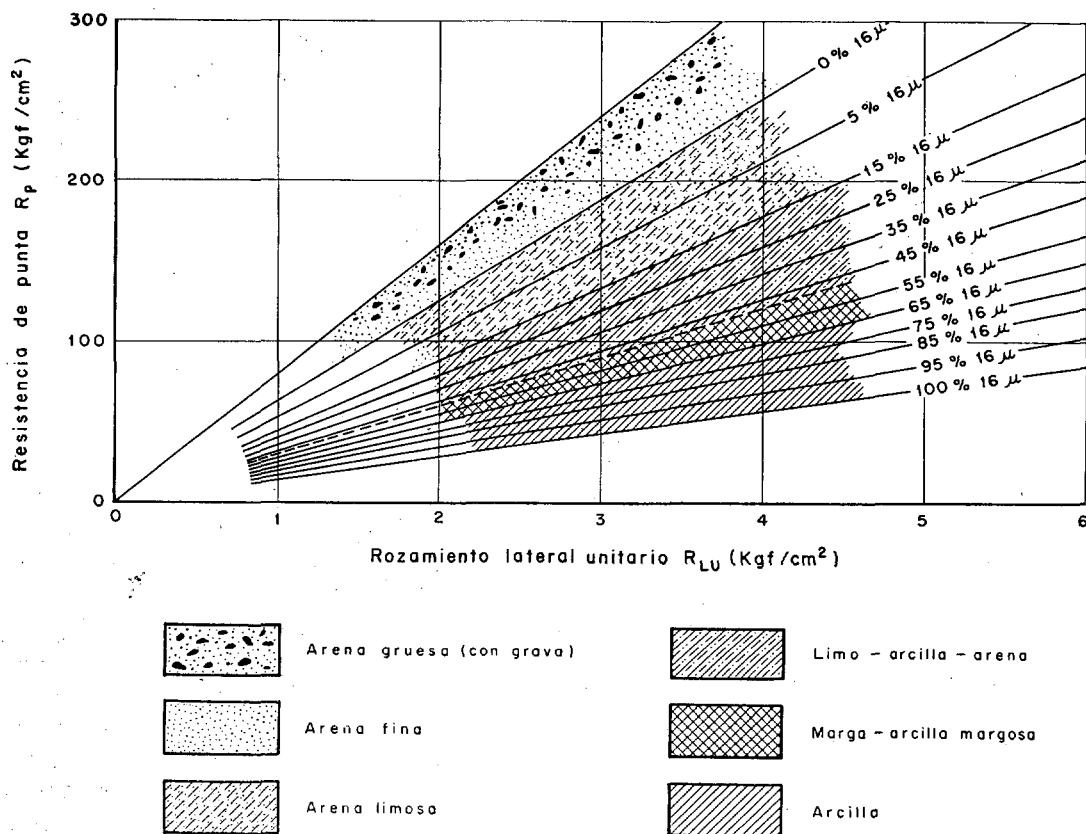


Fig. 12. — Gráfico para identificación de suelos.

Hoy puede decirse que cualquier campaña de reconocimiento bien planeada debe incluir sondeos de penetración, para completar los datos proporcionados por los sondeos de perforación y permitir la interpolación para un conocimiento total de la zona en estudio. De esta forma, la técnica de penetración utilizada adecuadamente permite reducir el número de sondeos necesarios a un mínimo indispensable, mientras se amplía la densidad de puntos estudiados y, por tanto, se mejora la calidad de la información.

Las repercusiones económicas son evidentes, tanto desde el punto de vista del coste de la campaña de reconocimiento, como del de la propia obra que se trate de proyectar. El

penetrómetro es, pues, un instrumento del máximo interés para arquitectos, ingenieros y técnicos. Gracias a él pueden economizar grandes sumas en las campañas de reconocimiento y adaptarse a los imperativos de la técnica moderna de la construcción, que exige cada vez un conocimiento más detallado del terreno.

El Servicio de Publicaciones del Ministerio de Obras Públicas acaba de publicar un libro de Guy Sanglerat, que tiene el indudable mérito de recoger una amplísima información y experiencia sobre el tema, a nivel internacional y totalmente puesta al día. Creemos que, sin duda, es la mejor referencia bibliográfica que se pueda citar aquí.