

FORMULAS DE HINCA DINAMICA(*)

Por H. BOLOMEY FRAZER

Ingeniero E.P.F.L.
Director Técnico de Geoexperts, S. A.

RESUMEN

La hincada dinámica de un penetrómetro o de un pilote permite estimar la resistencia de un terreno cuando se conoce la energía cinética que ha producido esta hincada, que debe ser igual al trabajo de hincada más las pérdidas de energía. Las pérdidas de energía útil para la hincada tienen tres orígenes distintos: las deformaciones elásticas de las piezas golpeadas y del suelo, la naturaleza anelástica del choque, la resistencia momentánea del agua a la hincada en terrenos coherentes de débil permeabilidad.

Las distintas fórmulas dinámicas, que se diferencian entre sí por los factores de correcciones que tienen en cuenta estas pérdidas, dan resultados parecidos para hincadas superiores a 2 cm. Para hincadas pequeñas, las pérdidas de energía aumentan rápidamente en relación con el trabajo útil, hasta llegar a un valor infinito para hincadas nulas, por lo que la resistencia teórica del terreno dependerá de la fórmula empleada, y no más de su resistencia real.

El artículo, después de analizar varias fórmulas de hincada, recomienda el empleo de una fórmula semiteórica, semiempírica, cuya solución está representada gráficamente. A continuación, se justifica la solución propuesta mediante unos ejemplos extraídos de centenares de experiencias adquiridas durante más de diez años. Se llega a la conclusión que los penetrómetros dinámicos dan valores más correctos que los penetrómetros estáticos en terrenos con elementos gruesos. Para la hincada de pilotes los rechazos pueden ser influenciados por el agua intersticial, por lo que es imprescindible aumentar los coeficientes de seguridad.

1. Fórmula general.

Los ensayos de penetración dinámica en un suelo de un cuerpo, pilote o penetrómetro, consisten en medir la hincada de este cuerpo bajo el efecto de una energía cinética conocida. Esta hincada, que depende principalmente de la resistencia del suelo, de la naturaleza del golpe y de la elasticidad del pilote y del terreno, corresponde a la transformación de la energía cinética en trabajo. Se puede escribir:

$$\begin{aligned} &\text{Trabajo de hincada} + \\ &+ \text{Energía cinética} = \text{Trabajo de deformaciones} + \quad (1) \\ &+ \text{Pérdidas.} \end{aligned}$$

Si se admite que el choque es perfectamente anelástico, es decir, que el cuerpo es indeformable y que después del golpe la maza acompaña en su descenso al cuerpo golpeado, formando con él un conjunto único, tenemos, según el teorema de la conservación de la cantidad de movimiento:

$$V_0 \frac{M}{g} = V' \frac{M+P}{g}; \quad V' = V_0 \frac{M}{M+P}$$

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la redacción de esta Revista hasta el 31 de marzo de 1972.

El conjunto $M + P$, con velocidad V' , debe vencer la resistencia R_d del terreno, que provoca una deceleración γ :

$$\gamma = g \frac{R_d}{M+P}$$

Después de un tiempo t , la velocidad de hincada es nula:

$$V = 0 = V' - \gamma t; \quad t = \frac{V_0 M}{g R_d}$$

Y la hincada será de:

$$e = \frac{1}{2} V' t = \frac{1}{2} \frac{V_0^2 M^2}{(M+P) g R_d}$$

Admitiendo una caída libre de la maza, se puede escribir:

$$V_0^2 / 2g = H \quad (2)$$

$$R_d = \frac{H M^2}{(M+P) e}$$

$$M H = R_d \cdot e + R_d \cdot e \cdot P/M \quad (3)$$

$$M H = R_d \cdot e + \frac{H \cdot P \cdot M}{M+P}$$

Energía cinética = Trabajo de hincia + pérdidas, choque perfectamente anelástico. (3)

Bajo el choque, el pilote o penetrómetro se acortará en una longitud $c' = \frac{R_d L}{E S}$, lo que representa un trabajo:

$$R_d \cdot \frac{c'}{2}$$

La ecuación general puede escribirse:

$$K_1 \cdot M \cdot H = R_d \cdot e + K_2 \cdot R_d \cdot \frac{c'}{2} + K_3 \frac{P M \cdot H}{M + P},$$

siendo K_1 , K_2 y K_3 coeficientes de corrección sin dimensiones.

2. Coeficiente de corrección.

2.1. K_1 .

Es un coeficiente igual o inferior a 1, y depende de las fuerzas que frenan la caída libre de la maza.

En el caso de penetrómetros, la caída es perfectamente libre y $K_1 = 1$.

En el caso de pilotes, la maza —al caer— hace girar el tambor del cabrestante que sirve para levantar la maza. La aceleración de giro del tambor representa una pérdida de energía útil, directamente proporcional a la altura de caída de la maza, y que depende de las características de la maquinaria. En la práctica, como la dimensión del tambor depende de la maza que debe levantar, la pérdida de energía es constante y del orden del 5 por 100 de la energía útil.

Tenemos:

$$K_1 M H = M H (1-0,05) \\ K_1 \simeq 0,95$$

En la práctica se admite, generalmente: $K_1 = 1$.

En las condiciones anteriores se ha admitido que después del golpe el trabajo debido a la gravedad durante la hincia es prácticamente nulo:

$$(M + P) e = 0.$$

Esta hipótesis simplificadora es correcta para terrenos no demasiado blandos, en los cuales $H > e$.

Para terrenos muy blandos, el primer término de la ecuación general debería escribirse:

$$M H + (M + P) e,$$

para $M + P \geq R_d$ el penetrómetro se transforma en estático, con $H = 0$.

2.2. K_2 .

A la energía perdida en la hincia por causa de la elasticidad del pilote o del penetrómetro se añaden las pérdidas debidas a las deformaciones de contacto sombrero-pilote y a las deformaciones elásticas del suelo. Por tanto: $K_2 > 1$.

Estas deformaciones secundarias aumentan cuando la resistencia a la penetración aumenta y el valor de K_2 crece con R_d , así como el valor de c' que aumenta proporcionalmente a R_d . Por esta razón, se introduce el factor de corrección c :

$$c = K_2 \cdot \frac{c'}{2}$$

$$K_2 R_d \cdot \frac{c'}{2} = R_d \cdot c$$

2.3. K_3 .

En la ecuación general, la expresión:

$$\frac{P M K}{M + P}$$

es igual a la pérdida de energía en el choque anelástico. Por tanto, $K_3 = 1$.

En el caso de choque perfectamente elástico y para $M = P$, no hay pérdida de energía y $K_3 = 0$.

En general, se escribe:

$$K_3 = 1 - n^2,$$

siendo n un coeficiente de restitución sin dimensión (Newton).

2.4. De las consideraciones anteriores, tenemos los valores siguientes de los factores de corrección K :

$$K_1 = 1; K_2 = 2 c/c'; K_3 = 1 - n^2$$

y la fórmula general (1) se transforma en la fórmula (4):

$$MH = R_d \cdot e + R_d \cdot c + (1 - n^2) \frac{a MH}{1 + a} \quad (4)$$

con $P/M = a$.

Esta fórmula se escribe normalmente:

$$R_d = \frac{MH}{e + c} \cdot \frac{1 + n^2 a}{1 + a} \quad (5)$$

o también:

$$R_d = \frac{MH}{(1 + a)e} \cdot \frac{1}{1 + c/e} (1 + n^2 a) \quad (6)$$

en la cual:

$\frac{MH}{(1 + a)e}$ = Resistencia del terreno, choque perfectamente anelástico.

$\frac{1}{1 + c/e}$ = Factor de corrección sin dimensión ≤ 1 , que tiene en cuenta las pérdidas de energía por deformación.

$(1 + n^2 a)$ = Factor de corrección sin dimensión ≥ 1 , que tiene en cuenta la elasticidad del choque.

En las fórmulas (5) y (6) se admite que la caída de la maza no está frenada por el dispositivo de levantamiento o de guía de la maza, y que el trabajo desarrollado por la gravedad durante la hinca es despreciable.

3. Fórmulas dinámicas.

3.1. Fórmula de Hiley.

Es la fórmula general en la cual se admite que las deformaciones elásticas de las piezas golpeadas y del terreno son inferiores al centímetro, es decir, que $c < 0,5$. Se admite, igualmente, que el choque no es perfectamente anelástico, y $n \neq 0$:

$c = 0$; $n = 0$ = Terrenos blandos, hinca fácil, hinca sobre pilotes de madera.

$c = 0,5$; $n = 0,4$ = Terrenos resistentes, hinca difícil (pilotes de hormigón).

$c = 0,5$; $n = 0,7$ = Hincas difíciles, golpe sobre acero (penetrómetros).

3.2. Fórmula holandesa.

Para terrenos blandos, donde se admite $c = 0$; $n = 0$, se obtiene la fórmula holandesa:

$$R_d = \frac{MH}{e} \cdot \frac{1}{1 + a} \quad (7)$$

3.3. Engineering news.

Es una de las fórmulas dinámicas más antiguas para el cálculo de la fuerza portante de un pilote. En ella se admite que el choque es perfectamente elástico, $n = 1$:

$$R_d = \frac{MH}{e + c} \quad (8)$$

En el empleo de esta fórmula se suele dar un valor de $c = 2,5$ cm. y adoptar un coeficiente de seguridad de 6, y la fórmula de Engineering news se escribe:

$$R_{\text{admisible}} = \frac{2MH}{e + 1} \quad (9)$$

donde H se mide en pies y $e + c$ en pulgadas.

3.4. Otras fórmulas.

Las fórmulas de Hiley, holandesa y de Engineering news son actualmente las de mayor uso. Pero existen otras numerosas que se emplean todavía.

3.4.1. Fórmula de Brix.

$$R_d = \frac{a MH}{(1 + a)^2 \cdot e} \quad (10)$$

Es válida para martillo a explosión de doble efecto, en el cual, la maza, después del golpe, no acompaña el pilote. En ella se admite que el choque es anelástico. En el caso de $a = 1$, esta fórmula es equivalente a la fórmula holandesa.

3.4.2. Si se admite que las pérdidas por deformación son equivalentes a una disminución H_0 de la altura útil de caída:

$$H_0 = \frac{H \cdot c}{e + c} \cdot (H_0 = H \text{ para } e = 0),$$

se obtiene una nueva fórmula general, en la cual se ha substituido el factor de corrección c por H_0 . La ventaja de esta fórmula consiste en que H_0 puede determinarse experimentalmente en cada terreno. Para choque perfectamente anelástico se obtiene la fórmula de Bredten Bracher:

$$R_d = \frac{M(H - H_0)}{e \cdot (1 + a)} \quad (11)$$

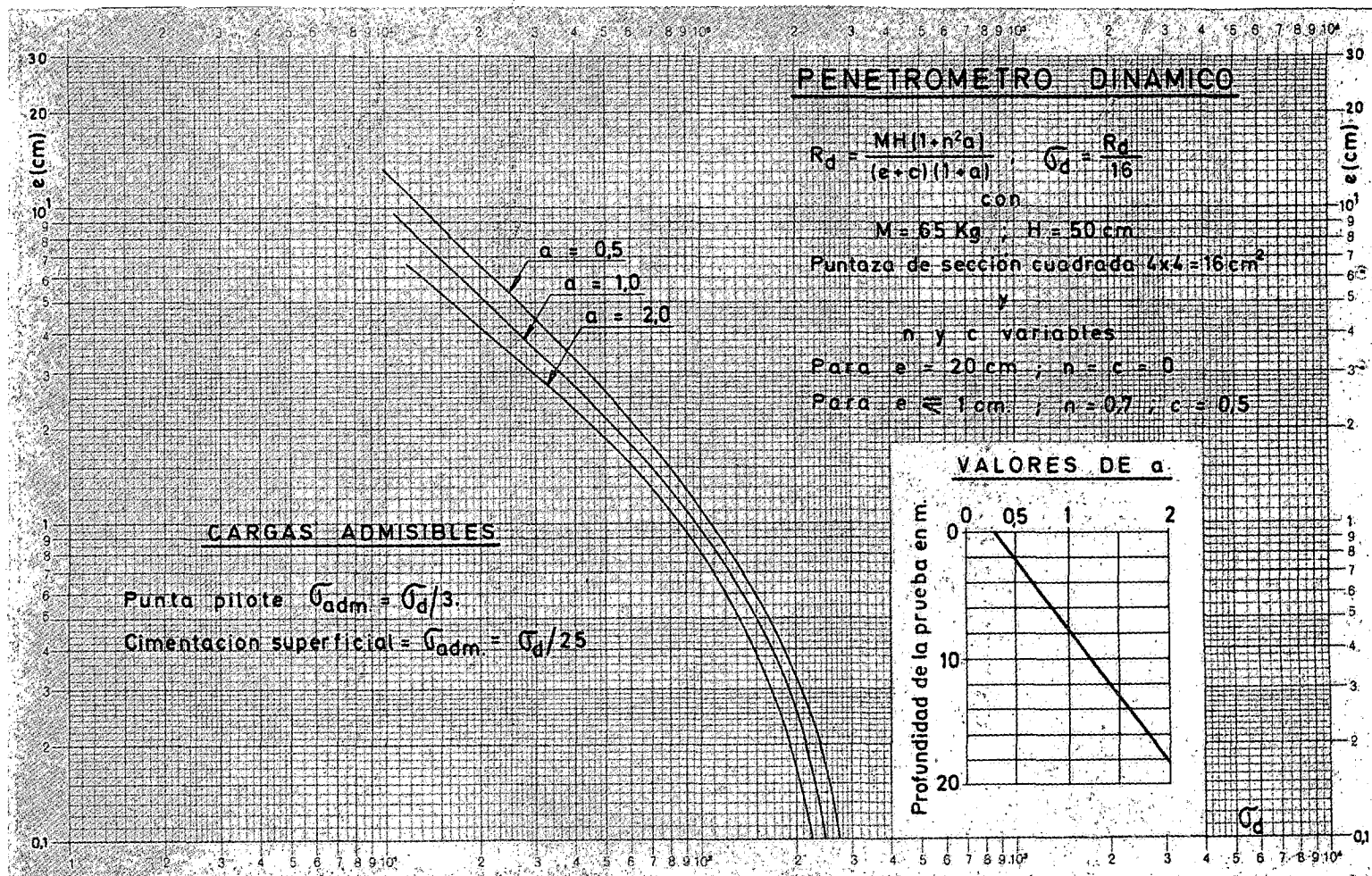


Figura 1.

En el caso de admitir $H_0 = 0$, se obtiene la fórmula holandesa.

3.4.3. Al no admitir el choque perfectamente anelástico:

$$n \neq 0; 1 + n^2 a > 1$$

se obtienen otras fórmulas conocidas, poco usuales, por ofrecer menor seguridad que las fórmulas (10) y (11).

3.5. *Campo de validez de las fórmulas dinámicas.*

3.5.1. *Fórmula de Engineering news.*

Utilizada para el cálculo de la carga admi-

ble sobre pilotes hincados, esta fórmula empírica, de empleo sencillo para calculistas que utilizan el pie y la pulgada como unidad de longitud, da valores de R_d parecidos a los de las demás fórmulas para rechazos comprendidos entre 1 y 3 cm, por golpes.

Por razones económicas, se para la hincada de un pilote cuando tiene estos rechazos. A hincadas superiores no se utiliza bien la capacidad portante del pilote, y a hincadas inferiores el coste de éstas aumenta rápidamente. La fórmula de E. N., que justifica estas hincadas, da buenos resultados, lo que explica su éxito.

3.5.2. *Fórmula holandesa.*

En la fórmula general (6), los dos factores

de corrección:

$$\frac{1}{1 + c/e} \text{ y } (1 + n^2 a)$$

tienden hacia la unidad, cuando e crece, ya que el valor de c disminuye relativamente al valor de e y que el coeficiente de recuperación de Newton n se anula, y la fórmula general se transforma en la fórmula holandesa. Pero si e disminuye y tiende hacia 0, el valor de R_d en esta fórmula tiende hacia un valor infinito, lo que es falso.

No se puede emplear la fórmula holandesa para $e < 2$ cm.

3.5.3. Fórmula de Hiley.

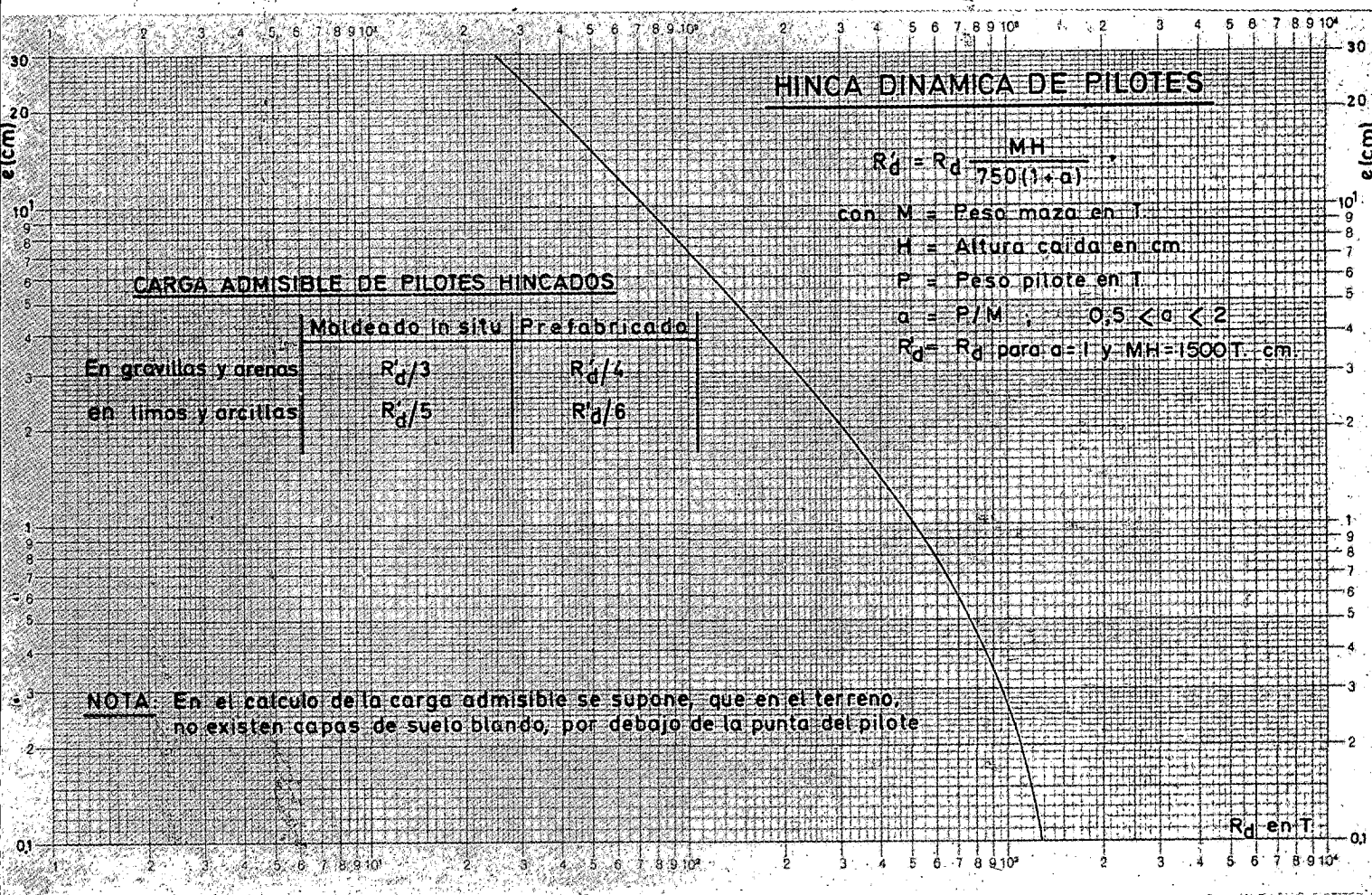
Hemos visto que la fórmula general no tiene en cuenta el trabajo durante la hincada, debido a la suma del peso de la maza y del penetrómetro o del pilote. Por este motivo, la fórmula general no es válida para hincas por golpes superiores a $0,4 H$.

Esta observación es válida para cualquier fórmula simplificadora de la fórmula de Hiley, como la fórmula holandesa.

Cuando e disminuye y tiende hacia 0 (rechazo absoluto) el valor de:

$$R_d \rightarrow \frac{M \cdot H}{1 + a} \cdot \frac{1 + n^2 a}{c}$$

Figura 2.



CURVAS DE PENETRACION ESTATICAS Y DINAMICAS

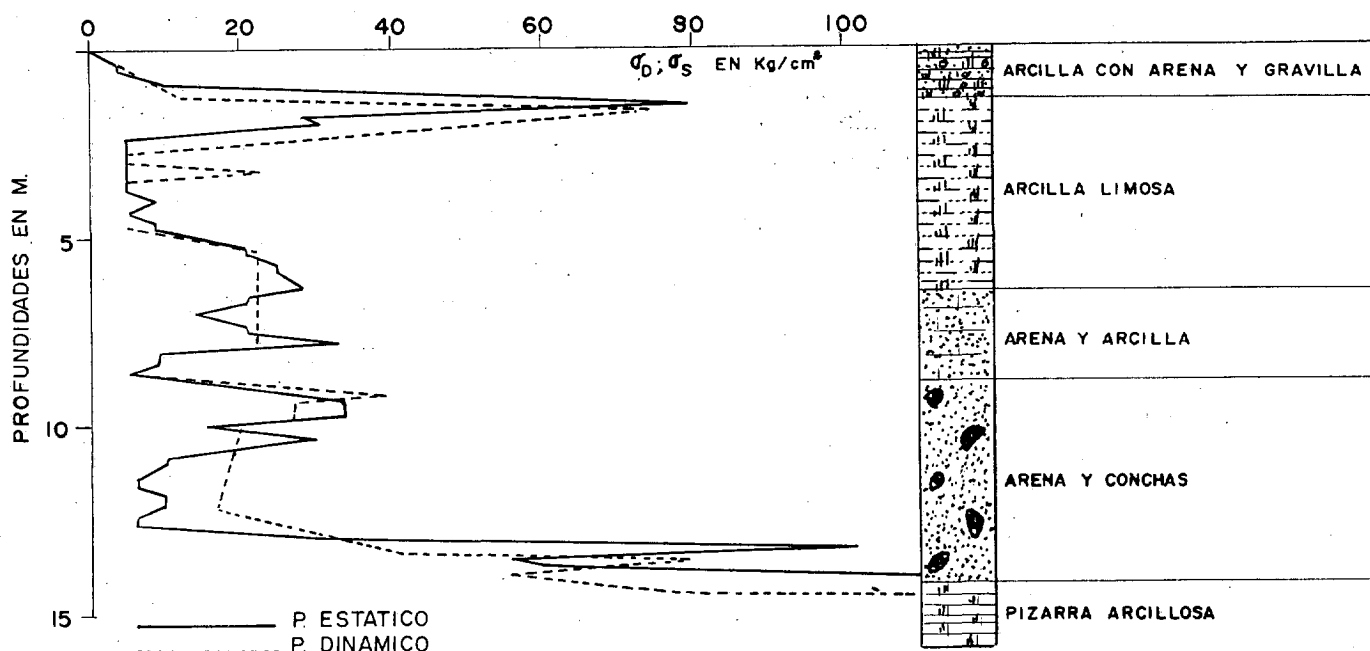


Figura 3.

y R_d deja de ser función de e , para depender únicamente de los valores M , H y a que caracterizan la prueba, y de los coeficientes de correcciones c y n , conocidos empíricamente.

3.6. Conclusiones.

Por todo lo expuesto, el campo de validez de las fórmulas de hincada dinámica es limitado, siendo la fórmula de Hiley la que tiene mayor extensión, por lo que se recomienda siempre su empleo. Esta fórmula se escribe:

$$R_d = \frac{M \cdot H}{e + c} \cdot \frac{1 + n^2 a}{1 + a} \quad (5)$$

Es válida para $0,4 H > e > 0,2$ cm.

Se debe siempre tener en cuenta que la fórmula de Hiley da la resistencia que ofrece el terreno a la hincada. Frecuentemente se admite que esta resistencia proviene únicamente de la punta y no igualmente de la fricción lateral. Hasta unos 15 m de profundidad para penetrómetros buenos esta hipótesis es correcta. Para mayores

profundidades y para pilotes, la fricción lateral puede ser importante.

La figura 1 da directamente la relación entre la resistencia unitaria del terreno y la hincada de un penetrómetro pesado, cuyas características están definidas en dicha figura. Se observa en el ábaco que las resistencias están comprendidas entre 10 y 250 Kg/cm². A estos valores corresponden sobrecargas admisibles debido a cimentaciones superficiales de 0,4 a 10 kilogramos/cm². Al emplear este ábaco se debe comprobar que el penetrómetro empleado tenga varillas perfectamente rectilíneas, y que la punta sea de sección cuadrada; en caso contrario, las hincadas serán más pequeñas y el valor de σ_d obtenido por el ábaco excesivo.

La figura 2 que da la fuerza portante de un pilote ha sido comprobada para $a \approx 1$ y $300 \leq M H \leq 1.500$ cm T.

Para pilotes de madera y para otros valores de a y $M H$, se recomienda aumentar los coeficientes de seguridad, hasta que se compruebe la validez del ábaco.

4. Comparación de los valores de resistencia del terreno obtenidos mediante ensayos de penetraciones dinámicas y estáticas.

El ábaco que da, para un penetrómetro dinámico, la resistencia σ_d del terreno con relación al rechazo resulta de un conjunto de consideraciones teóricas y empíricas, las primeras para la elección de la fórmula empleada, las segundas para fijar valores a los factores de corrección c y n .

Con el empleo de este ábaco se obtendrán

valores de la resistencia del terreno al punzonamiento, iguales o inferiores a los valores obtenidos mediante penetrómetros estáticos, pero nunca superiores para profundidades inferiores a 15 m. Esta afirmación se basa sobre millares de ensayos realizados en España en terrenos muy distintos, como terrenos coherentes o incoherentes, sueltos o compactos, rellenos artificiales o naturales de origen marítimo y fluvial.

Los penetrómetros empleados tienen las características siguientes:

PERFILES CON LINEAS DE IGUAL RESISTENCIA

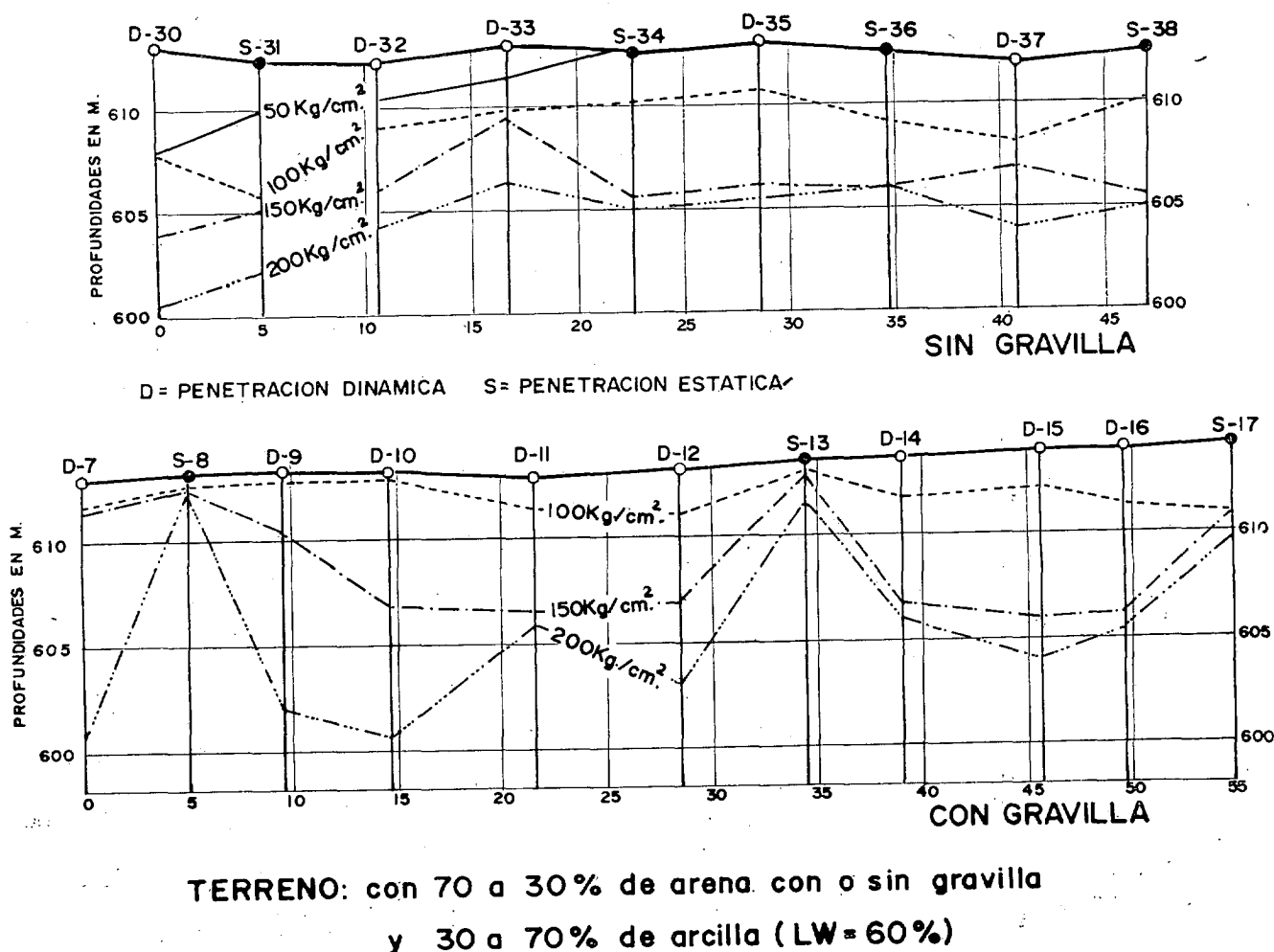


Figura 4.

4.1. *Penetrómetro dinámico.*

Sus características son las siguientes:

Peso de la maza en Kg: $M = 65$.

Peso del varillaje en Kg: $P = 10 + 6,30 \times$ (longitud
varillaje en m).

Altura de caída de la maza en cm: $H = 50$.

Puntaza de sección cuadrada de $4 \times 4 = 16 \text{ cm}^2$.

Varillaje de $\varnothing 32 \text{ mm}$.

Estas características corresponden a la de un penetrómetro pesado. Se eliminó el empleo de aparatos ligeros por aumentar la dispersión de los resultados y las resistencias teóricas obtenidas (pandeo, fricción lateral, dimensión relativa excesiva de los granos del terreno con relación a la puntaza y limitación del campo de validez de la fórmula de hinca).

Se eliminaron igualmente puntazas cónicas, por aumentar con su empleo la fricción lateral sobre el varillaje, sin haber estudiado el porqué de este aumento.

La sección del varillaje es suficiente para recibir el golpe sin pandear; no es excesiva y permite alcanzar profundidades de 18 m, sin que el factor a , relación entre peso penetrómetro y maza, pase del valor de 2.

4.2. *Penetrómetro estático.*

Tiene las características siguientes:

Carga máxima: 10.000 Kg.

Mediciones por separado de la resistencia a la punta y por fricción lateral.

Sección de la punta cónica, 10 cm^2 .

Esta sección de la punta es pequeña, por lo que, en presencia de gravas gruesas en el suelo, se obtienen resistencias del terreno superiores a la real. Pero no se puede aumentar el diámetro de la punta sin aumentar de manera prohibitiva el coste del ensayo.

4.3. *Resultados obtenidos.*

Con el empleo del penetrómetro dinámico, descrito anteriormente, y del ábaco se obtienen valores idénticos de la resistencia del terreno, que mediante penetrómetros estáticos cuando el terreno, compacto o blando, no tienen granos iguales o superiores al tamaño de una arena media (0,6 mm.).

En caso contrario, las resistencias dinámicas obtenidas pueden ser inferiores a las estáticas. Esta diferencia es máxima en los casos siguientes:

- Terrenos incoherentes de granulometría uniforme. En este caso la diferencia aumenta con el tamaño de los granos.
- Terrenos arcillosos con gravillas y gravas.
- Terrenos coherentes cuya resistencia medida con el penetrómetro estático es superior a 200 Kg/cm^2 .

Por lo expuesto, el cálculo de una cimentación a base de ensayos dinámicos ofrece mayor seguridad que el cálculo basado sobre penetrómetros estáticos.

Estas consideraciones explican los desperfectos sufridos por construcciones antiguas, algunas de la época romana, por causa de las vibraciones debido a la circulación moderna. Con los valores de resistencia obtenidos por pruebas estáticas, estos desperfectos frecuentemente no se justifican.

4.4. *Ejemplos característicos.*

El primer ejemplo corresponde a ensayos sobre arenas arcillosas y arcillas arenosas compactas con o sin gravilla, en los alrededores de Madrid (fig. 4).

En el perfil 1, en el cual no se observó gravilla, los penetrómetros estáticos y dinámicos dan la misma resistencia teórica del terreno. En el perfil 2 la presencia de gravilla hace que se obtengan, mediante penetrómetros estáticos, resistencias excesivas.

El segundo ejemplo corresponde a un reconocimiento del terreno en los alrededores de Barcelona (fig. 5).

Se observa que las dos clases de las curvas envolventes de las resistencias mínimas coinciden. Por el contrario, debido a la presencia de gravas, los envolventes de la resistencia máxima son distintos.

El tercer ejemplo corresponde a terrenos blandos, constituidos por arcillas y fangos más o menos arenosos, en un solar del Norte de España de unas 6 Ha., reconocido por gran número de sondeos de reconocimiento, así como por penetrómetros estáticos y dinámicos (figura 3).

CORRELACION ENTRE PENETROMETROS ESTATICOS Y DINAMICOS

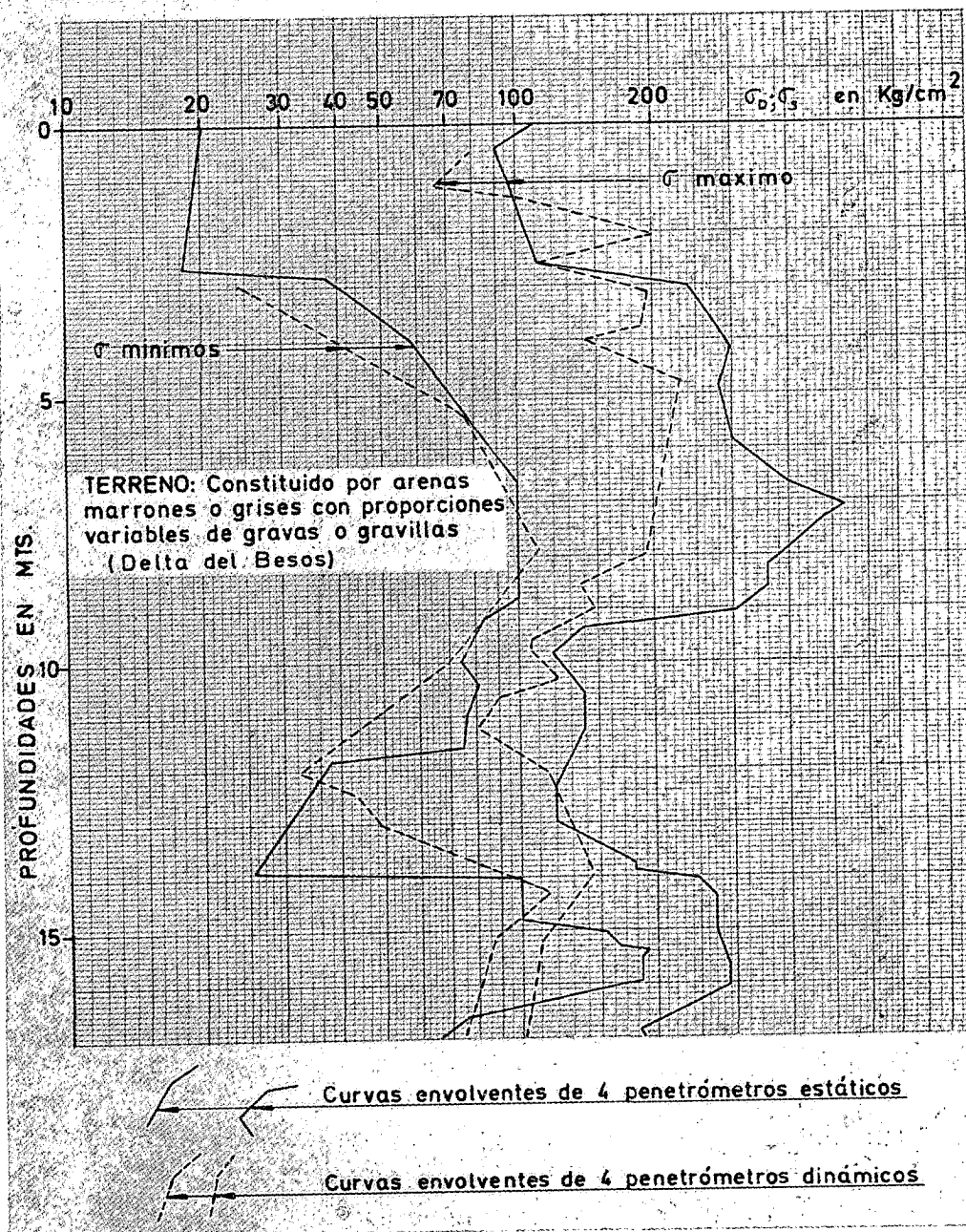


Figura 5.

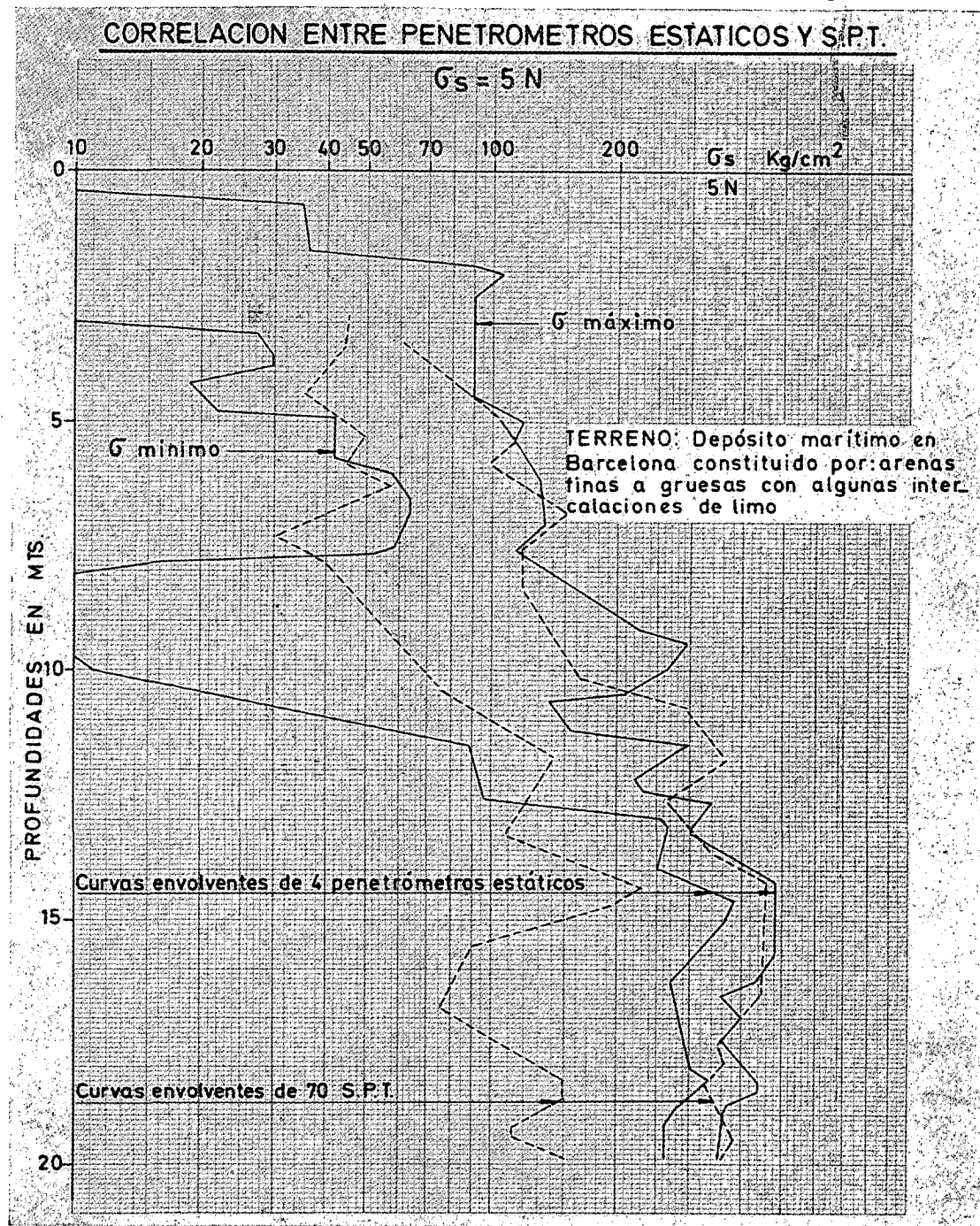


Figura 6.

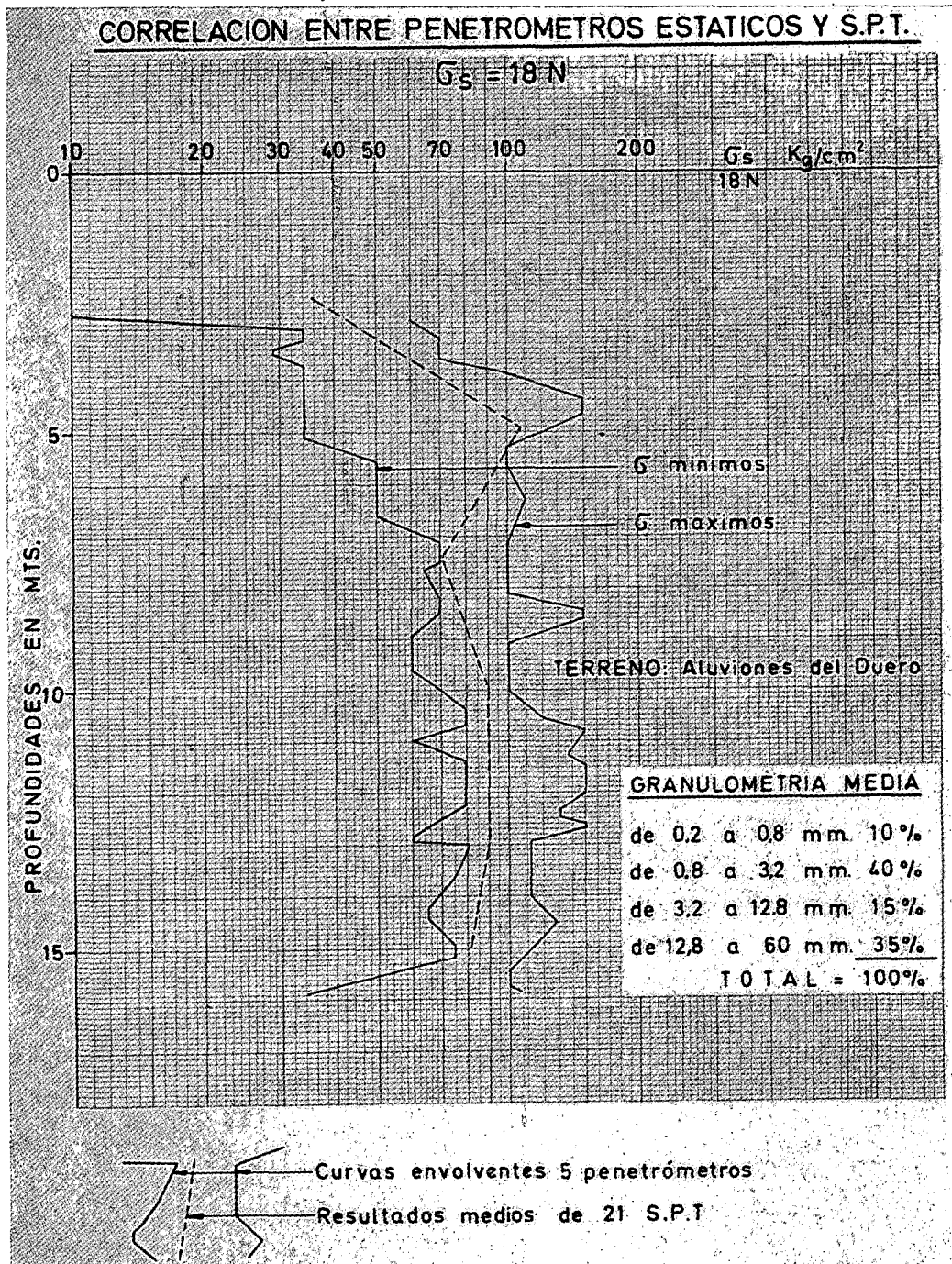


Figura 7.

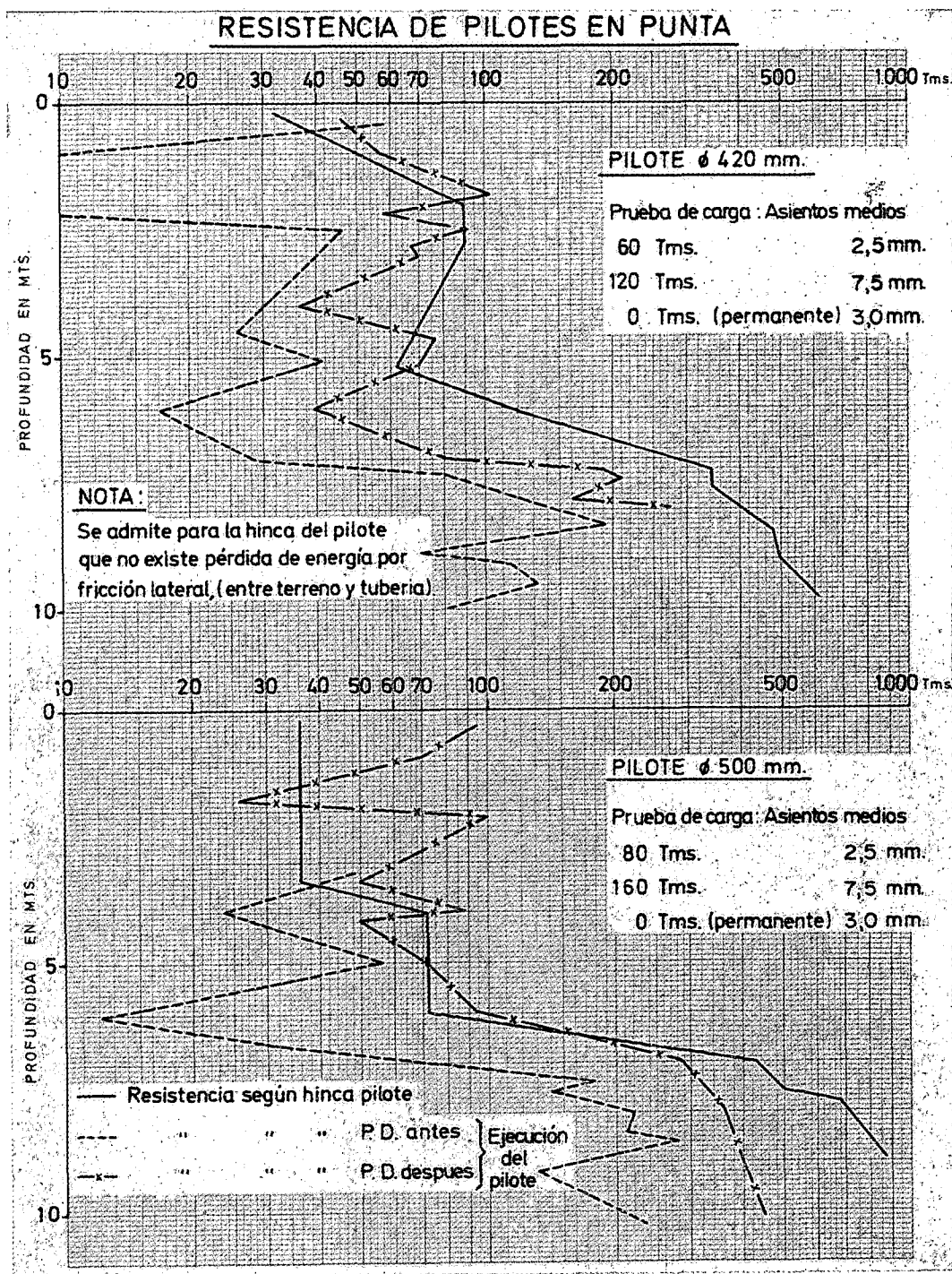


Figura 8.

El gráfico corresponde a dos penetrómetros situados entre sí a un par de metros de distancia. La perfecta correlación entre los resultados de los penetrómetros estáticos y dinámicos demuestra que en este caso de terrenos blandos la presencia de arena en ellos no afecta al resultado del penetrómetro estático.

5. Correlación entre ensayos de penetración estándar (S.P.T.) y penetración estática.

El S.P.T. es un ensayo de penetración dinámica de un tubo normalizado en el terreno, sobre una profundidad pequeña, comprendida entre tres y nueve veces su diámetro. No se puede emplear en este ensayo las fórmulas de hincada dinámica, válidas para el cálculo de la carga de punzonamiento del terreno a profundidades grandes en relación con la sección de la puntaza.

Se admite frecuentemente que:

$$\sigma_s = 3N,$$

siendo N el valor del S.P.T.

En realidad, cuando el terreno contiene arena es más correcto admitir:

$$\sigma_s = 4N.$$

Pero el factor que multiplica N para obtener σ_s puede ser muy superior. En las figuras 6 y 7 se dan dos ejemplos, en los cuales estos factores son, respectivamente, de 5 y 18.

En este segundo caso, el terreno corresponde a aluviones recientes y gruesos del río Duero, sobre los cuales no se puede admitir cimentación superficial para construcciones importantes, a pesar del buen resultado de los ensayos de penetración estática.

Este ejemplo es una muestra más del peligro de fiarse de los penetrómetros estáticos ejecutados en terrenos de granulometría gruesa. En estos terrenos cualquier ensayo dinámico es preferible al penetrómetro estático.

Ahora bien, si el S.P.T. bien ejecutado puede dar datos muy valiosos de las características mecánicas de un terreno, es siempre preferible utilizar el penetrómetro descrito anteriormente, porque su empleo resulta más económico y más seguro por ser de ejecución más rápida y depender menos los resultados obtenidos de la calificación del personal que ejecuta las pruebas.

Desgraciadamente, la frecuencia del empleo del S.P.T. por un personal no calificado ha producido un descrédito de este ensayo, que se repercute de manera injustificada sobre todos los ensayos dinámicos de penetración.

6. Correlación entre penetrómetro dinámico, hincada de pilote y pruebas de carga.

Los penetrómetros dinámicos no compactan el terreno durante la hincada de la puntaza, por lo que los resultados obtenidos coinciden con los ensayos de penetración estática.

Los pilotes hincados, de sección muy superior a los penetrómetros, modifican la compactación y la estructura del terreno.

En terreno incoherente, de permeabilidad relativamente elevada, la hincada mejora las características mecánicas del terreno.

En terrenos de granos finos, limos y arcillas, no solamente no se compacta el terreno, sino que, a veces, se rompe su estructura y su cohesión y la resistencia del terreno al final de la hincada puede resultar inferior a la resistencia inicial. Además, la incompresibilidad del agua en el terreno puede falsificar la interpretación de las mediciones de hincada del pilote.

Por estos motivos, el cálculo de la fuerza portante de un pilote hincado a base de ensayos de penetración estática o dinámica puede dar resultado equivocado. Si se calcula esta fuerza portante a base de la hincada del pilote, el coeficiente de seguridad a adoptar en terrenos finos deberá ser superior al empleado para terrenos de granos gruesos.

Como demostración de la influencia de estos factores, puede citarse la experiencia adquirida en un solar de 50 Ha. cuadradas, sobre el que se había previsto la construcción de casas cimentadas sobre pilotes, para millares de viviendas. Parte del proyecto está ya ejecutado y algunas casas tienen varios años de vida.

El reconocimiento del terreno se hizo mediante sondeos de reconocimiento, con extracción de muestras intactas y ensayos S.P.T.; pruebas de penetración dinámica y pruebas de penetración estática.

El terreno estaba constituido por depósitos del delta del Llobregat, de un espesor indefinido. De arriba abajo se encuentran sucesiva-

mente arcillas marrones blandas, arenas con proporciones variables de gravas y limos, y, finalmente, arenas limosas.

En estos terrenos había que multiplicar por 3 a 5 el valor N del S.P.T. para obtener la resistencia, según penetrómetro dinámico de 90 a 200 Kg/cm² en las arenas con o sin limos y gravas, y de 70 a 120 Kg en las arenas limosas. Los penetrómetros estáticos dan, respectivamente, 90 a 450 y 70 a 120 Kg/cm².

Como se observa por estos valores, coinciden las resistencias obtenidas de los penetrómetros dinámicos y estáticos cuando no existen en el terreno arenas gruesas, gravillas o gravas. En caso contrario, las primeras son inferiores a las segundas.

Los pilotes para la cimentación de los edificios tenían que resistir a una carga doble de la de servicio, sin que se produzca a la descarga un asiento permanente superior al medio centímetro. De los estudios de laboratorio, de las pruebas de penetración y de una prueba de carga sobre pilote perforado y moldeado *in situ*, se admitía que una cimentación sobre pilotes cortos no era factible si se quería cumplir con los asientos previstos.

En realidad se han ejecutado millares de pilotes hincados y moldeados *in situ*, y un medio centenar de ellos han sido sometidos a pruebas de carga con éxito.

La figura 8 enseña cómo la hincada del pilote compacta el terreno y explica este resultado.

7. Conclusiones.

La fórmula general o de Hiley permite calcular, a base de la hincada dinámica de un penetrómetro o de un pilote, la resistencia del terreno a la hincada estática de una puntaza cónica o la fuerza portante del pilote. En esta fórmula entra

en consideraciones la mayor parte de los datos que influyen sobre la penetración de la pieza golpeada. Basada sobre consideraciones teóricas, contiene factores de corrección cuyos valores se determinan por experiencia. La fórmula de Hiley es, por tanto, una serie teórica, empírica.

Empleando siempre el mismo penetrómetro dinámico, equipado de una puntaza de sección cuadrada de 4 x 4 cm., y siempre la misma energía de golpeo, se ha conseguido valorar los factores de correcciones en este caso, y construir el ábaco de la figura 1.

Igualmente, para pilotes hincados se dibujó el ábaco de la figura 2.

Si se comprueban los valores de hincada dinámica, calculada con el ábaco y los valores medidos con el penetrómetro estático, se observa que las primeras son iguales o inferiores a las segundas, y son más correctas. En efecto, la presencia de elementos gruesos en el terreno falsifica el resultado de los penetrómetros estáticos que dan entonces valores demasiado altos. Se recomienda, por tanto, el empleo del penetrómetro dinámico para terrenos que tienen resistencia a la penetración, comprendida entre 10 y 200 Kg/cm².

En cuanto a la hincada de pilotes, el ábaco da, a veces, valores erróneos de la carga de rotura, motivo por el cual el coeficiente de seguridad a emplear varía según el terreno y el tipo de pilote hincado.

La carga admisible sobre el terreno no depende solamente de la resistencia del terreno, sino igualmente de las características de la construcción, en particular de las deformaciones admisibles debido a los asientos diferenciales. Para cargas elevadas, construcciones rígidas y cimentación de maquinaria es imprescindible determinar estos asientos mediante ensayos de laboratorio.