

COMPACTACION EN PROFUNDIDAD MEDIANTE VIBROFLOTACION (*)

Por CARLOS FARACO MUÑOZ

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director Técnico de Geos, S. A

Se describe un método para la compactación en profundidad de terrenos, que puede emplearse con diversos fines: aumento de la capacidad de carga, modificación de la permeabilidad de un terreno, densificación para producir zonas de anclaje, estabilización de taludes, etc. El procedimiento puede aplicarse tanto a terrenos no cohesivos (arenas) como en terrenos cohesivos (arcillas), aunque la forma de aplicación sea algo diferente, según la aportación de agua o material de adición. Se expone el proceso seguido y diversos ejemplos de aplicación.

1. Introducción.

La compactación en profundidad de terrenos de débil capacidad de carga son técnicas bien conocidas en la actualidad, pero su utilización es aún muy limitada dentro de nuestras fronteras.

Es un hecho conocido que la compactación de un nuevo relleno es posible llevarla a cabo mediante placas o rodillos vibrantes. Para que la compactación sea satisfactoria se requiere que el material se extienda por tongadas. Sin embargo, los estratos naturales y los rellenos no compactados durante su formación, así como los rellenos hidráulicos no pueden ser compactados por tongadas. Es necesario, por tanto, que el útil de compactación penetre en el interior de la masa de suelo, cuya densificación se busca.

Uno de los métodos más eficaces y económico para compactar estratos de débil capacidad de carga es el de Vibroflotación.

2. Desarrollo del método y posibilidades.

La concepción original del método es debida a Steuermann, y fue llevado por primera vez a la práctica por la empresa alemana Johann Keller hacia el año 1940.

El mismo Steuermann lo introdujo en Estados Unidos, y posteriormente fue introducido en Inglaterra.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de octubre de 1974.

Las primeras publicaciones sobre el nuevo método datan de 1938 (Schneider, Das Rütteldruckverfahren und seine anwendung in Erd und Betonbau) y 1939 (Steuermann, A new soil compaction device). Desde entonces son múltiples las publicaciones que describen una gran variedad de trabajos ejecutados por este procedimiento.

La principal o primaria utilidad del método es conseguir una mayor capacidad de carga de los estratos débiles del terreno, reduciendo los asentamientos producidos por cargas verticales. Se utiliza, asimismo, para otros tipos de aplicaciones, tales como: modificación de la permeabilidad de un terreno, densificación del terreno para producir zonas de anclajes, estabilización de taludes, etc.

Es necesario resaltar aquí que la vibroflotación puede efectuarse tanto en terrenos no cohesivos (arenas) como en terrenos cohesivos (arcillas), pero la forma de aplicación son un tanto diferentes en uno u otro tipo de material. Describimos más adelante la forma de tratamiento en cada uno de los dos tipos de suelos.

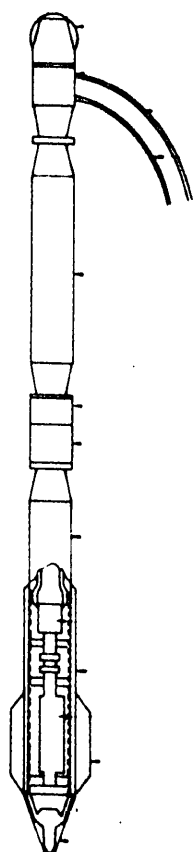
3. Equipo de compactación.

El equipo mecánico que produce la compactación en profundidad consta esencialmente de:

1. El vibrador que está suspendido de elementos de prolongación.
2. El sistema de inyección de agua o aire.
3. El aparato de soporte, que puede ser una grúa adecuada o un aparato especial.

El vibrador, propiamente dicho, es un cuerpo tubular de acero, dentro del cual un motor eléctrico o hidráulico acciona una serie de discos excéntricos (fig. 1). Tanto la fuerza de vibración como la frecuencia pueden, en principio, ser adaptadas a las condiciones particulares de cada obra, pero, dada la gran variedad de suelos existentes incluso en una misma re-

El vibrador es introducido dentro del terreno hasta la profundidad deseada con el auxilio de un chorro de agua a presión que sale de su punta y a continuación es gradualmente extraído (fig. 2). Durante este segundo paso se transmiten las vibraciones al suelo circundante, produciendo su compactación. En caso necesario pueden utilizarse varios vibradores acoplados (figura 3).



- Anillas para elevación.
- Mangueras de agua.
- Mangueras hidráulicas.
- Tubos de prolongación.
- Aislador de vibraciones.
- Vibrador.
- Motor hidráulico.
- Paso de agua a la punta.
- Excéntrica.
- Aletas para evitar el giro.
- Punta.

Figura 1.

gión, conviene utilizar una frecuencia media fija.

El agua o el aire, así como la corriente eléctrica, son introducidos por un cabezal especial dispuesto en la parte superior de los tubos de prolongación.

Entre el vibrador y los tubos de suspensión se sitúa un acoplamiento elástico, que permite la transmisión de fuerzas de tracción y de compresión.



Figura 2.

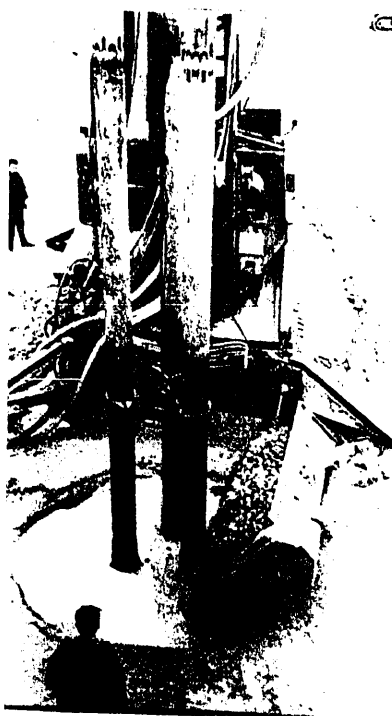


Figura 3.

4. Tratamiento de suelos no cohesivos.

Las arenas flojas, así como los rellenos artificiales, suelen poseer un ancho rango de densidades en el área de ubicación de una obra. Tales variaciones de densidad pueden originar asientos diferenciales en la estructura en proyecto, por lo que la mejor forma de tratamiento de suelos no cohesivos es producir una zona

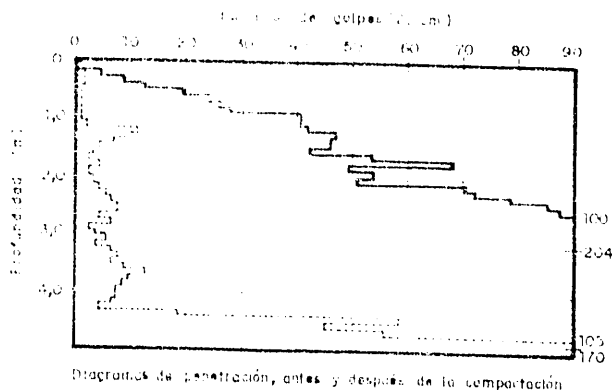


Figura 4.

de terreno bajo la superficie de una densidad alta y uniforme.

El terreno tratado puede llegar hasta capas de terreno resistentes, pero lo usual es mejorar el suelo únicamente hasta que el bulbo de presiones, por teoría elástica, produzca presiones admisibles. En general, es suficiente 6-8 m de profundidad.

El espaciamiento entre puntos de compactación se determina por las tolerancias de asientos para las cargas a aplicar y depende de las características del terreno. La profundidad alcanzada en la actualidad es de hasta 35 m.

La mayor parte de los métodos para determinar asientos están relacionados directa o indirectamente con la densidad relativa de las arenas. La norma usual es efectuar ensayos de penetración para determinar tanto la densidad relativa como los asientos esperados (fig. 4). En la figura 5 se esquematiza el procedimiento a emplear para producir la compactación en suelos no cohesivos.

a) Se coloca el vibrador con los elementos de prolongación, sujetos mediante un aparato de soporte adecuado, sobre uno de los puntos a compactar.

Una vez puesto en marcha el motor del vibrador se establece una salida de agua en la punta y se comienza a introducir el aparato.

Alrededor del vibrador se produce una saturación del terreno de tal forma que bajo la influencia de la vibración se halla en un estado de suspensión local.

El vibrador y los tubos de prolongación penetran rápidamente en el interior del terreno.

b) Después de alcanzar la profundidad requerida, se corta la alimentación de agua. De acuerdo con las características del terreno, esta alimentación puede continuar aunque en forma reducida.

La compactación comienza gracias a las vibraciones, y el terreno de alrededor se compacta sin formación de tensiones internas. El agua facilita la acomodación del terreno y elimina la cohesión aparente que pueda existir.

La compactación se traduce, en general, en la formación de un embudo en la superficie del terreno.

c) El embudo se rellena con material de aporte, bien procedente del exterior o de las capas superiores del terreno.

Si es necesario modificar la granulometría del terreno se puede utilizar material de aporte de granulometría adecuada.

El resultado es la formación de una masa de terreno compactado de forma sensiblemente cilíndrica.

La repetición de este proceso en sucesivos puntos, siguiendo una malla, permite obtener la consolidación de una masa de terreno determinada.

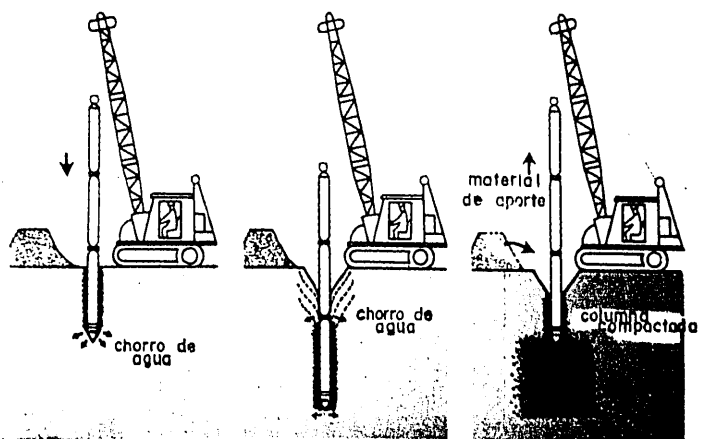


Figura 5.

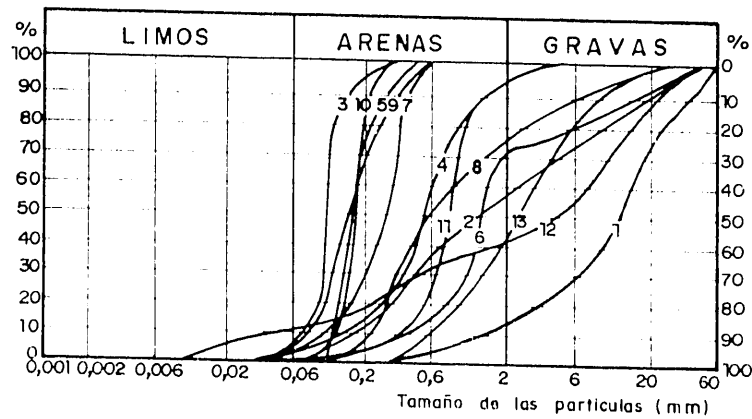


Figura 5-a.

Algunas curvas granulométricas de terrenos en los cuales se ha aplicado esta técnica se indican en la figura 5-A.

4.1. Efecto de la compactación.

A este respecto son de gran interés los ensayos realizados por BASORE, C. E. para medir la efectividad de la compactación en función de la distancia entre centros de tratamiento.

Los puntos de ensayo en planta, en número de 16, estaban dispuestos en grupos de 4, 5,

6, 7 y 8 pies. La situación de los ensayos se indica en la figura 6.

Se efectuaron ensayos de penetración dinámica antes y después de la compactación, situándose el punto de ensayo en el centro de cada grupo de tres puntos que poseían un espaciamiento determinado. La relación entre la resistencia a la penetración y la distancia entre puntos de compactación para profundidades de 10 y 20 pies se indica en la figura 7.

Posteriormente se determinó la densidad relativa de la arena en el centro de los grupos cuyo espaciamiento era 5, 6 y 7 pies. La densidad de la arena aumenta al disminuir el espaciamiento entre puntos de compactación (figura 8).

El efecto de compactación expresado en términos de densidad relativa decrece de forma exponencial a medida que crece la distancia radial al punto de compactación.

Asimismo el radio de la zona de influencia alrededor de un punto de inserción del vibrador decrece a medida que crece el contenido de finos (limo y arcilla) en la arena. En arena limpia una compactación notable puede obtenerse a distancias radiales de hasta 1,5 m del centro de compactación, pero en arenas con contenido en finos superior al 15-20 por 100 se puede obtener poco incremento de densidad a distancias radiales superiores a 0,5 m.

La explicación de este hecho es fácil si se analiza lo que ocurre en el interior del terreno. En suelos no cohesivos las vibraciones impartidas provocan una anulación temporal de las fuerzas friccionales entre granos, de manera que éstos se reagrupan bajo la acción de la

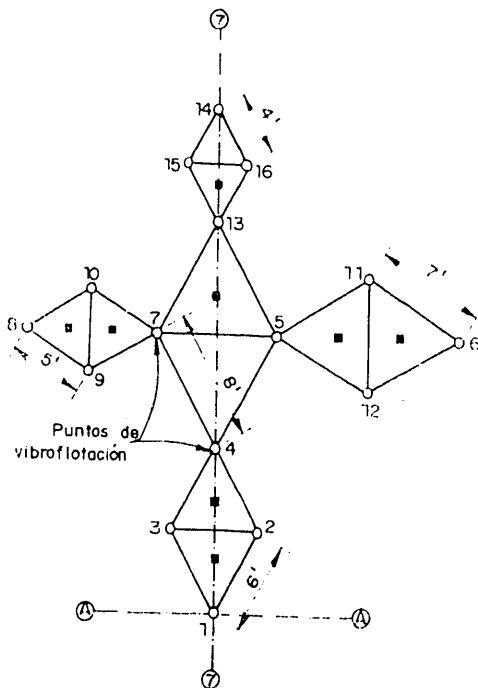


Figura 6.

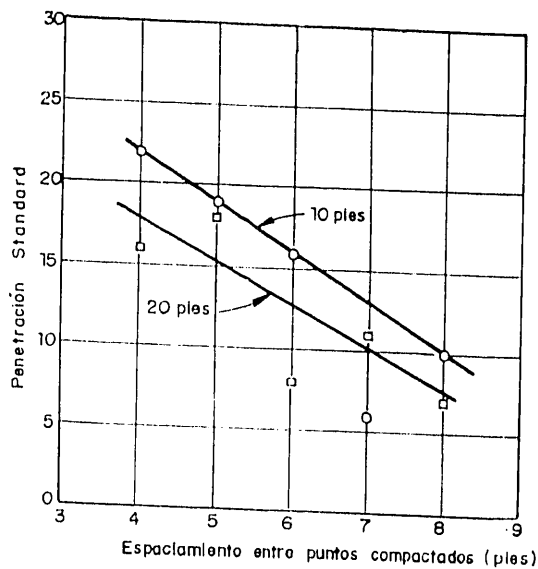


Figura 7.

gravedad. Pero la baja permeabilidad del terreno, debida a la presencia de finos, puede anular este efecto, puesto que el suelo debe expulsar el fluido intersticial para conseguir la compactación.

Por otra parte, en suelos cohesivos la eliminación de las fuerzas friccionales entre los granos es impedida por la cohesión, de tal forma que es imposible realizar la compactación del terreno mediante las vibraciones producidas en su interior.

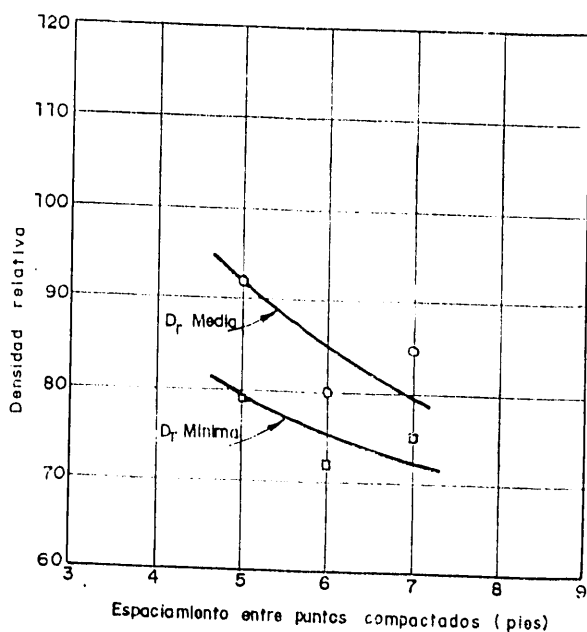


Figura 8.

A continuación vemos un procedimiento para conseguir un mejoramiento notable de los terrenos cohesivos con la ayuda del vibrador.

5. Tratamiento de suelos cohesivos.

Los suelos cohesivos no son prácticamente afectados entre puntos de tratamiento. Estos suelos pueden únicamente aumentar su resistencia introduciendo gravas en los orificios originados por el vibrador, el cual es introducido previamente en el terreno. La compactación de las gravas se realiza de forma idéntica a la del material de aporte de suelos no cohesivos.

Con este procedimiento se forma una densa y relativamente resistente columna en los centros de cada punto de tratamiento. El material grueso se introduce lateralmente en el terreno, desplazándolo y densificándolo, formándose un conjunto estable. Dichas columnas actúan como drenes verticales que permiten el drenaje del agua intersticial del suelo fino, aumentando así su resistencia.

La formación de los orificios se consigue, en el caso de suelos finos con bajo contenido de agua, mediante las fuerzas horizontales impartidas por el vibrador. Cuando el contenido de agua es elevado o cuando se trabaja debajo de la capa freática el orificio se forma nuevamente con la ayuda de un chorro de agua emergente de la punta del vibrador.

En las figuras 9 y 10 se esquematizan los

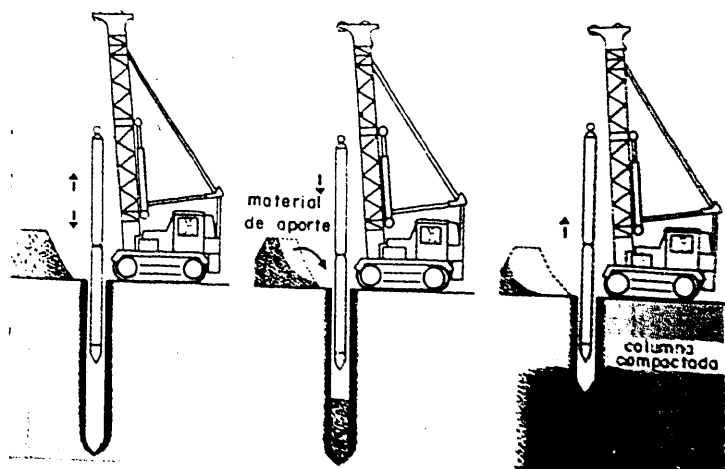


Figura 9.

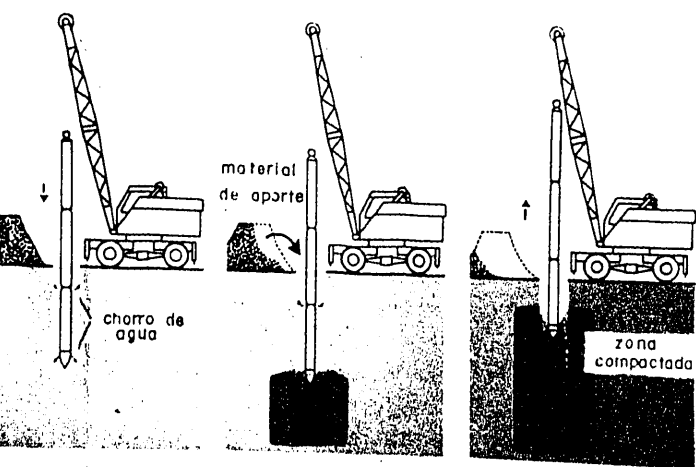


Figura 10.

métodos de aplicación del vibrador en suelos con bajo y alto contenido de humedad.

La conveniencia de usar gravas en lugar de arenas fue demostrada en unos ensayos realizados en Bremerhaven. Las características del

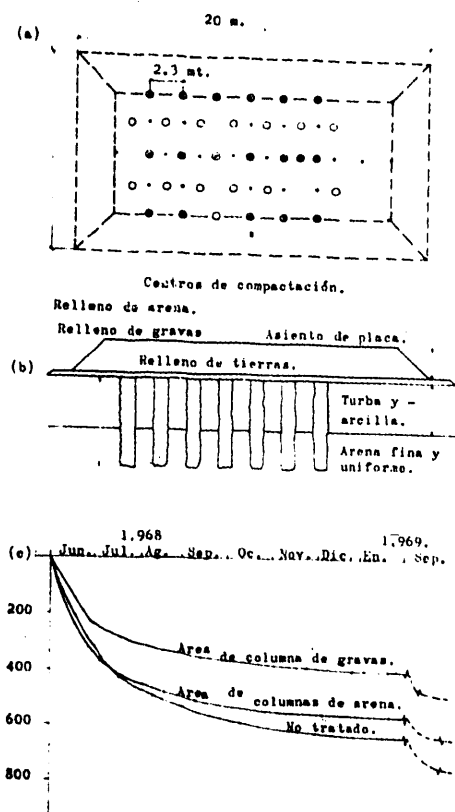
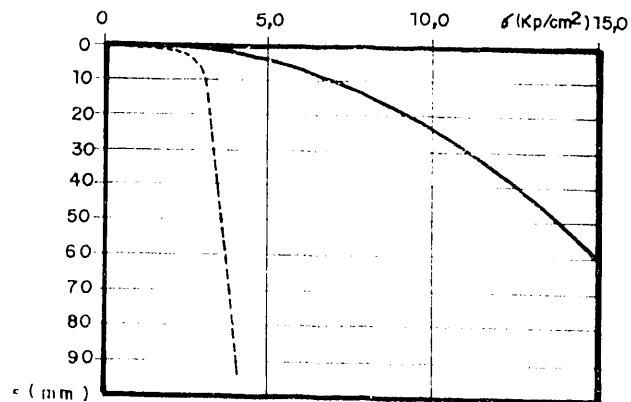


Figura 11.



Diagramas carga-asiento de ensayos de placa realizados antes y después de la compactación

Figura 12.

terreno se indican en la figura 11, que también muestra la distribución del tratamiento.

Incluso con un espaciamiento relativamente grande (2-3 m) entre columnas de grava, se redujo el asiento casi a la mitad. La reducción con columnas de arena fue únicamente un 15 por 100 en relación al suelo sin tratar.

La distancia entre centros de columnas de grava depende de las condiciones de suelo a tratar y de los resultados deseados. Asimismo depende de estos factores las profundidades a alcanzar.

Generalmente se dispone un punto por cada metro cuadrado de superficie cuando las condiciones son muy adversas, pudiéndose en casos más favorables llegar a unos 6 m² por punto.

En cuanto a profundidades se alcanzan perfectamente los 15-20 m de columna de gravas, como mejoramiento de suelos cohesivos.

Los ensayos de penetración no son adecuados para determinar la nueva capacidad portante del terreno y deben utilizarse ensayos de carga con placas que constituyen el método de control más seguro, si bien naturalmente más costoso (figura 12).

6. Algunas aplicaciones del procedimiento.

Con objeto de que se conozca alguna de las posibilidades que el método de vibroflotación puede ofrecer a la solución de algunos problemas técnicos, ofrecemos a continuación una relación de casos concretos en los que el pro-

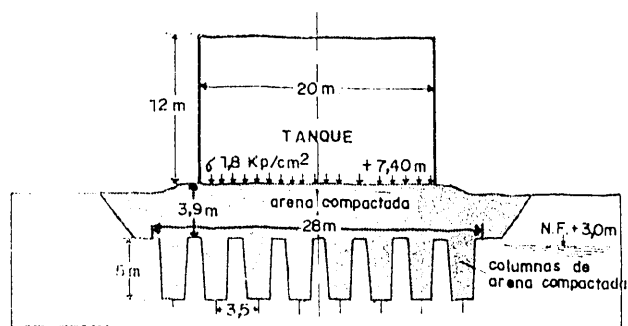


Figura 13.

cedimiento se ha utilizado con muy diversos fines.

A) *Depósito cimentado sobre columnas de gravas en el Puerto de Burdeos (fig. 13).*

Se utilizaban anteriormente pilotes de 18 a 20 m de profundidad.

El suelo estaba constituido por un espesor de 15 a 18 m de limos inadecuados para la cimentación de un depósito. El nivel freático se encontraba a 3 m de profundidad.

Se utilizaron 63 puntos de 5 m de profundidad y de 3 m² de sección en una malla de 2,50 x 3,50 m.

El material de aporte fue arena de 0,2 a 0,8 mm. Se cargaron a 3,3 Kg/cm².

Las medidas efectuadas con escisiómetros e isótopos mostraron un aumento de cohesión de 2 a 5 Tn/m² y un aumento de la densidad seca de un 8 por 100.

Los asientos fueron inferiores a los autorizados.

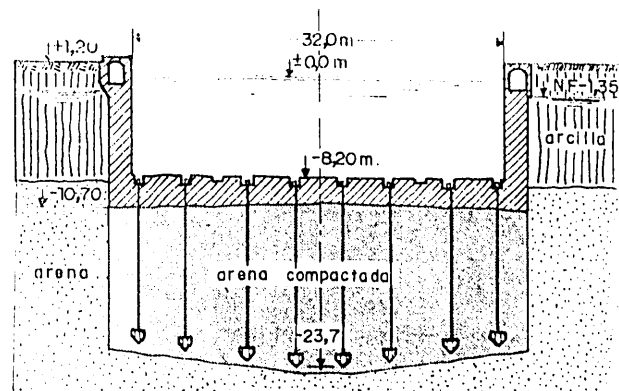


Figura 14.

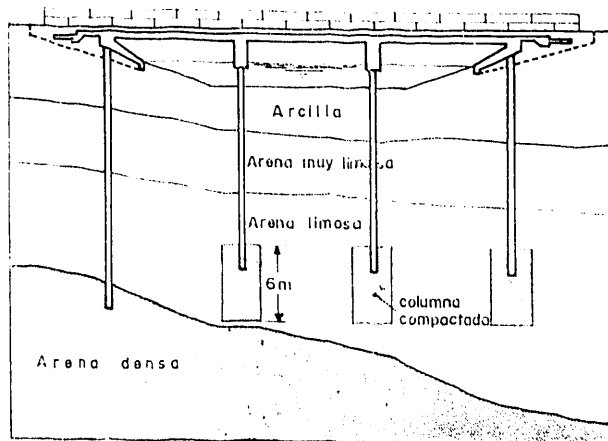


Figura 15.

De forma similar se han cimentado varios depósitos de combustibles en las cercanías de Lisboa.

B) *Anclaje de un dique seco en el Mar del Norte (fig. 14).*

Se utilizaron 496 anclajes para resistir las subpresiones.

La longitud de anclaje fue 11 a 14 m y fueron colocados con ayuda de dos vibradores. Cada uno de los anclajes se tardó dieciocho minutos en colocarlo.

C) *Cimentación de un puente en Amsterdam (figura 15).*

Mientras que en el estribo izquierdo hacían falta pilotes de 17,50 m, en el otro eran necesarios pilotes de 22 a 26 m.

Una gran economía se consiguió compactando el suelo a fin de reducir la longitud de los pilotes a 13,50 m, economizando 440 m de pilotes.

D) *Disminución de la permeabilidad de un terreno.*

En el caso de la figura 16, en Zurich, no se podía rebajar la capa freática por su efecto sobre las instalaciones vecinas. Se compactó el terreno hasta 6 u 8 m de profundidad utilizando arena fina como material de aporte. La reducción de la permeabilidad se estimó en 30 veces.

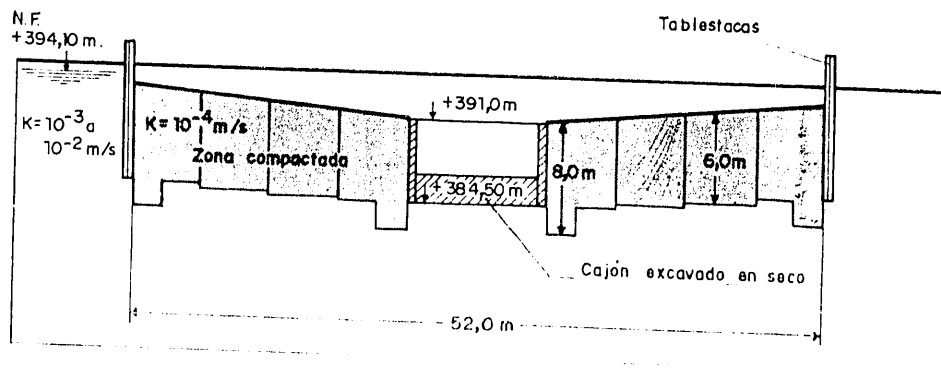


Figura 16.

En la actualidad se está aplicando el método en gran escala en los diques laterales del Danubio, en Austria.

E) *Aumento de la estabilidad de un talud en la Autopista de Wartjenstedt (fig. 17).*

El terraplén de la autopista se encontraba sobre una capa de limos orgánicos de 2,50 a 3 m de espesor. Existía peligro de deslizamiento

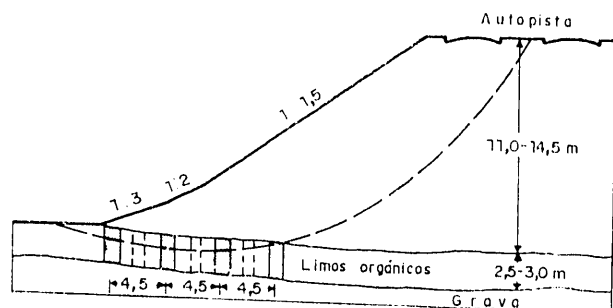


Figura 17.

según el círculo indicado en la figura. Mediante el empleo de columnas de gravas se logró aumentar la seguridad del talud de 1 a 1,32.

7. Trabajos en España.

En España es de aplicación esta técnica en rellenos artificiales, formaciones recientes (Al-

geciras, Prat de Llobregat, etc.) y en general en todo terreno de débil capacidad de carga.

Destacamos como trabajos realizados en España: las cimentaciones de la Central Térmica de Badalona (1964-65) y dos nuevos grupos electrógenos de dicha Central (1971) y la cimentación de un grupo electrógeno y un depósito de combustible de la Central Térmica de Besós (1969).

8. Conclusiones.

Las cimentaciones realizadas por el procedimiento de vibroflotación han alcanzado un rango de presiones admisibles de 2 a 6 Kg/cm² sobre materiales granulares. El procedimiento se ha comprobado durante treinta y cinco años.

El tratamiento sobre terrenos cohesivos a base de columnas de gravas se ha efectuado con éxito en los quince últimos años.

Es un procedimiento que, en los lugares donde es técnicamente aceptable, puede resultar más económico que pilotar. Posee además otra serie de posibilidades en la que no actúa en competencia con los pilotajes. No obstante, son necesarios más ensayos y medidas de asientos en estructuras reales, especialmente en suelos arcillosos, para avanzar en la técnica de vibroflotación.