

COMPACTACION DINAMICA DEL SUELO

Por ANTONIO ANGULO ALVAREZ,

Ingeniero de Caminos.

Entre los diversos métodos de compactación de suelos, se encuentra el dinámico o vibratorio, de aplicación a suelos arenosos, con poca arcilla y también a firmes. El artículo destaca las características del sistema, maquinaria y aplicaciones, cada día más extensas e importantes.

Concepto.

En términos generales, la compactación del suelo se hace aplicando cargas unitarias importantes, que actúan durante más o menos tiempo sobre la superficie del suelo a compactar. Por lo tanto, todos los sistemas pudieran denominarse "dinámicos", pues en sí lo son, si bien podemos establecer una amplia clasificación, aplicando el repetido calificativo de "dinámicos" a los sistemas en los que prepondera la acción de masas en movimiento, y el de "estáticos" a aquellos en los cuales las masas actúan de modo fundamental, por su propio peso.

Ejemplos de los compactadores estáticos son: los rodillos, los de neumáticos, las apisonadoras, etc.

No hemos de ocuparnos en estas notas de los sistemas de compactación "estática", sino de la pujante técnica de la compactación dinámica, que si ha alcanzado ya notable extensión, es de esperar que en un futuro próximo se considere fundamental en la construcción, en atención a que los medios que precisa son más reducidos y económicos que los propios de la compactación estática y la eficacia de los mismos notablemente superior.

Generalidades.

El problema de compactar el suelo es tan antiguo como la ingeniería misma, pero su importancia crece a medida que las construcciones que sobre los suelos se edifican tienen mayores dimensiones o se exige mayor constancia en la forma del suelo.

Más adelante, y una vez que se haya pasado revista a la técnica de la compactación dinámica, volveremos a destacar la importancia del asunto.

El presente artículo sólo pretende mostrar aquellas aplicaciones o equipos de los que ha tenido conocimiento o intervención el autor, esperando que su escasa experiencia pueda servir de algo a los lectores de la REVISTA en tan importante asunto.

La primera de estas aplicaciones fué con motivo del ensanche de la carretera de Madrid a Barcelona, en las proximidades de Alcalá de Henares. Se trataba de ensanchar 75 cm. a cada lado del firme, debiendo establecer tal ensanche sobre lo que antes eran paseos.

El Ingeniero encargado, D. Luis Sierra, proyectó el firme con piedra gruesa, rellenos los huecos con arcilla, y consolidado todo ello por vibración. La Empresa contratista fué Cubiertas y Tejados, S. A., y se solucionó el problema de la compactación con el sistema que se aprecia en la figura 1.ª, o sea con bandejas vibrantes, accionadas por vibradores eléctricos. Por esta razón hubo necesidad de instalar un grupo electrógeno que producía la energía eléctrica precisa para todos los vibradores. Este grupo se aprecia en la parte izquierda de dicha fotografía.

Esta misma fotografía fué publicada por la REVISTA en su número de marzo de 1954, con motivo de un artículo escrito por el Profesor D. José Luis Escario.

La obra se ejecutó durante la primavera de 1953. Los vibradores eran del tipo utilizado normalmente para el hormigón, con 3 000 vibraciones por minuto, desarrollando una fuerza dinámica de 200 Kg.

Aun cuando tal equipo (como veremos más adelante) no fué el idóneo, sino el que pudo prepararse



Figura 1.ª

entonces, el resultado de la compactación ha sido excelente, pues ya han pasado más de tres años y la superficie de los ensanches está perfecta, sin el menor asiento.

El caso anterior, primero para el autor, es una demostración palpable de la importancia que tiene la técnica de la compactación dinámica, pues dada la anchura de los ensanches (tan sólo 75 cm.), hacia inadecuado el empleo de apisonadoras, haciendo ver un campo específico de tal tipo de compactadores. Ahora bien, comprobado el excelente resultado obtenido, cabe preguntarse si debe ceñirse la compactación dinámica a estos casos o si debe extenderse para zonas más amplias. La contestación es clara, según se deduce más adelante.

Premisas y cálculos.

Tanto de la experiencia nacional como de aquella que se tiene del extranjero, es sabido que la compactación dinámica es adecuada cuando el suelo es principalmente arenoso, o con algo de arcilla, pero predominando la arena. También es adecuada para gravas o gravillas, por lo que se llega a la conclusión de que la compactación dinámica es adecuada para suelos *no coherentes* y para consolidación de *firmes en general*.

Se tienen referencias de experimentos hechos en Norteamérica (Estado de Nueva Jersey) con varios compactadores dinámicos de diferentes tipos, arrojando, como es lógico, resultados también distintos, pero como en su conjunto son tan demostrativos, a continuación se mencionan los más destacados:

a) El terreno, antes de la compactación, tenía una densidad de 1,6, equivalente a una densidad Proctor del 83 %, igual a todas las profundidades.

b) Después de verificada la compactación dinámica, la densidad se elevó a más del 97 % para todos los casos, a una profundidad de 30 cm. En esta profundidad, el sistema de compactación dinámica más eficaz logró una densidad Proctor del 107 %.

c) Para la profundidad de 60 cm., la densidad Proctor alcanzada con el sistema óptimo fué del 103 %, y la lograda con el sistema más inadecuado, de los ensayados, fué de 93 %.

d) Para la profundidad de 90 cm., la densidad mínima alcanzada fué la misma que tenía el terreno, o sea el 83 %, utilizando una vibración de 40 hertzios. La máxima densidad alcanzada fué del 95 % Proctor, con un compactador adecuado.

e) Para todas las profundidades se logró el máximo de densidad con sólo dos pasadas de un vibrador de 1 600 Kg. de peso, montado sobre una bandeja de 93 dm.² y actuando una fuerza pulsatoria de 1 800 Kg. a la frecuencia de 25 hertzios.

Puede apreciarse que los efectos de la compactación dinámica son muy acusados, ya que penetran en el suelo a bastante profundidad, a contar desde la superficie sobre la que se actúa.

También es del mayor interés la influencia de la frecuencia de la compactación. La figura 2.^a representa, en ordenadas, los distintos asientos observados en diferentes tipos de terreno sometidos a compactación, aplicando la misma carga de 150 Kg. a diversas frecuencias, que se indican en las abscisas.

Se aprecia claramente que para arena de playa y arena de miga, se produce un asiento máximo para la frecuencia de 22 hertzios, con valores de los citados asientos notablemente superiores a los logrados, para los mismos terrenos, con otras frecuencias en los compactadores. Para la arena margosa, la frecuencia óptima fué la de 19 hertzios.

El comentario obligado, por la gran semejanza que tiene con los fenómenos de mecánica general y de electrotécnica, es que el máximo asiento, que corresponde a la máxima compactación, se produce cuando existe *resonancia* entre la frecuencia del compactador y la propia del terreno.

Esto explica la escasa eficacia indicada en el apartado d) antes citado, pues se aplicó una frecuencia de 40 hertzios, muy distinta de la propia del terreno (22 hertzios), y por ello su efecto sólo alcanzó a las capas superficiales.

Nos atrevemos, pues, a enunciar una conclusión: *La frecuencia del compactador debe coincidir con la propia del terreno.*

La misma referencia del Estado de Nueva Jersey indica el notable incremento que se produce si en lugar de estar el terreno seco se le humedece. Por ejemplo, en un caso concreto de arena de miga, el asiento, en determinadas condiciones, fué de 0,8 unidades para terreno seco y de 5,3 unidades cuando estaba saturado de agua. El orden de magnitud de la compactación, de estar seco a estar saturado el terreno, es de *seis veces*.

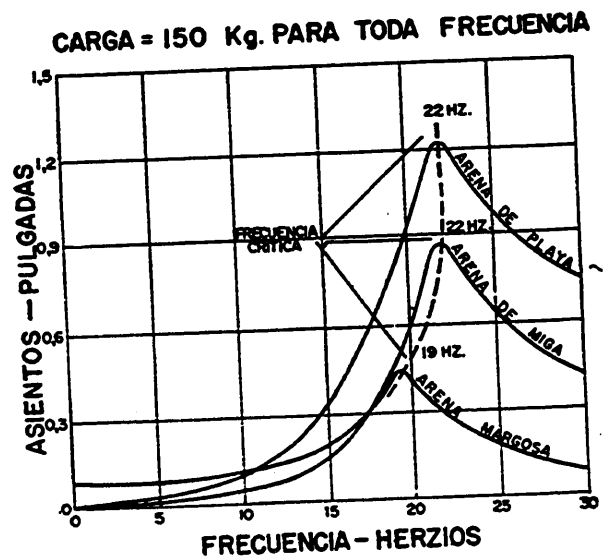


Figura 2.^a

También este resultado nos lleva a otra conclusión: *La máxima eficacia de la compactación dinámica se logra en terrenos saturados de agua.*

Antes de seguir adelante, haremos un inciso para mencionar el sistema de *vibroflotación*, que se utiliza intensamente en Alemania y ha sido descrito en diversas publicaciones especializadas. (Entre otras *The Dock & Harbour Authority*, junio 1955). Se trata de un potente vibrador que se introduce en el terreno ayudado por un chorro de agua, que sale por su extremo inferior. Este agua, además de producir el arrastre preciso para que vaya penetrando el aparato, inunda el terreno. Una vez alcanzada la profundidad deseada, se corta el paso de agua al surtidor de la punta o extremo inferior, y se hace que salga por la parte superior del aparato. En estas circunstancias, se eleva el conjunto, que ha estado vibrando durante todo el tiempo de la operación.

Pues bien, este sistema de vibroflotación (la figura 3.^a es la fotografía de un aparato utilizado en España por la firma *Pilson, S. L.*, de la que es Director el Ingeniero de Caminos D. Francisco Zapata), utiliza las dos condiciones mencionadas. Empleo de una frecuencia adecuada en un suelo saturado de agua.

La frecuencia normal en estos aparatos es la de 24 hertzios, relativamente próxima a las obtenidas en Nueva Jersey, como óptimas.

Damos por terminado el inciso y estudiamos seguidamente el funcionamiento de un compactador típico, compuesto de una bandeja, que se apoya sobre el terreno, equipada con un vibrador que desarrolla una fuerza máxima que designamos por f a una fre-

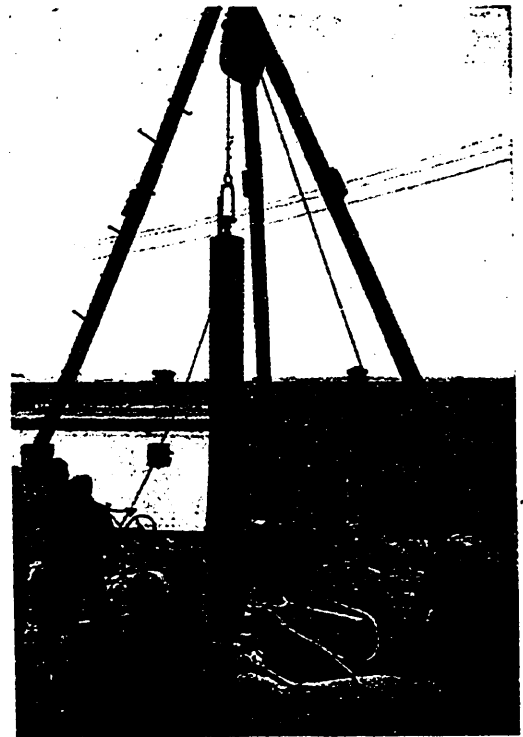


Figura 3.^a

característica del suelo afectado, ω la velocidad angular ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot F$) y t el tiempo.

Si suponemos el conjunto de suelo y vibrador, que es el caso real, el movimiento del suelo no es amortiguado, ya que en cada periodo recibe el impulso del vibrador. En virtud de la resonancia, la

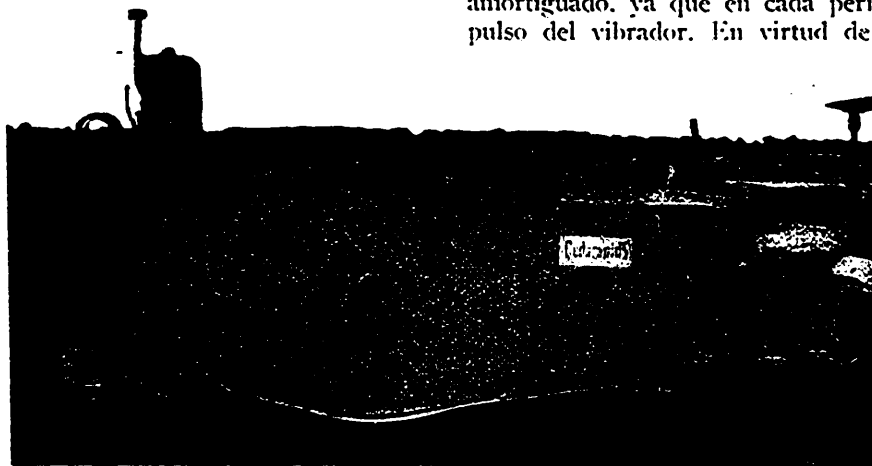


Figura 4.^a

cuencia F . El peso del conjunto lo designaremos por P .

Si el impulso dado por el vibrador fuera único, el movimiento del terreno tendría por ecuación:

$$y = A \cdot e^{-K \cdot t} \cdot \text{sen } \omega t,$$

en la que A es la amplitud inicial. K una constante

aportación de energía efectuada, en cada golpe, por el vibrador, será igual para todos los golpes.

La energía que proporciona el vibrador será la de su fuerza viva, que tiene por expresión:

$$\frac{1}{2} \cdot \text{masa} \cdot \text{velocidad}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{g} \cdot V^2.$$

En esta igualdad conocemos la masa. La velocidad viene definida por el movimiento vibratorio del aparato, que se establece cuando ha botado sobre el suelo, y cae de nuevo. En estos instantes está sometido a la acción de la gravedad, que despreciamos por ser pequeña en comparación con la que produce la fuerza f de dicho vibrador. No fatigamos la atención del lector con la deducción correspondiente, pero la velocidad máxima del vibrador tiene por expresión:

$$V \text{ máx.} = \frac{f}{P} \cdot \frac{g}{\omega}$$

La velocidad que tiene cuando se produce el choque ha de ser proporcional a la máxima, o sea que

$$V = c \cdot \frac{f}{P} \cdot \frac{g}{\omega}$$

Sustituyendo, tenemos que la energía aportada por cada golpe del vibrador vale

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{P}{g} \left[c \cdot \frac{f}{P} \cdot \frac{g}{\omega} \right]^2 = \frac{c^2}{2} \cdot \frac{g}{\omega^2} \cdot \frac{f^2}{P}$$

En la idea de que el máximo rendimiento se logra cuando la energía dada por el vibrador, en cada golpe, es mayor, tenemos que su eficacia crece con el cuadrado de la fuerza f desarrollada por el mecanismo, y decrece en razón inversa de la masa del conjunto del vibrador.

Por otra parte es evidente que un tipo cualquiera de compactador, definido por su peso P y la fuerza dinámica f que desarrolla, resultará tanto más eficaz cuanto menor sea el volumen de suelo a que afecte, y como este volumen ha de ser mayor o menor, cuan-



Figura 6.ª

to mayor o menor sea la superficie de la "bandeja" del compactador, resulta que la mayor eficacia se obtiene con pequeñas "bandejas", denominando así a la superficie de contacto entre compactador y suelo.

Todo lo anterior nos lleva a enunciar las siguientes condiciones que debe reunir un buen compactador:

1.ª Su frecuencia debe poder regularse para hacerla coincidir con la propia del terreno en cada instante, pues quizá cambie también con el estado de compactación.

2.ª Su fuerza debe ser la mayor posible, compatible con buen funcionamiento del aparato.

3.ª No debe lastrarse. Su peso debe ser, pues, el estricto para garantizar la solidez del conjunto.

4.ª La superficie en contacto con el suelo debe ser la menor posible.

Aplicaciones.

La extensión que va tomando la compactación dinámica de suelos puede apreciarse por los numero-

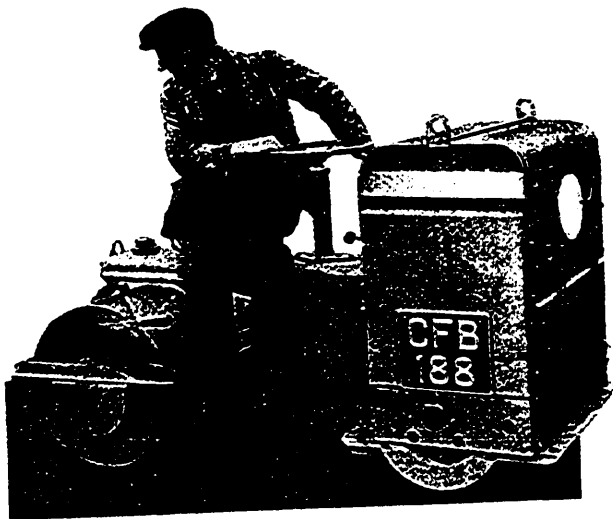


Figura 5.ª



Figura 7.ª

dos tipos de equipos que se fabrican y forman parte de los catálogos de los fabricantes especializados.

La figura 4.^a es una fotografía de una apisonadora-vibradora americana, arrastrada por un tractor. Está provista de neumáticos y puede variarse la frecuencia de la vibración entre 10 y 23 hertzios. Es un caso mixto de compactación "estática" en atención al gran peso del conjunto (13 000 Kg) y también "dinámica" por tener una fuerza pulsatoria de unas 10 toneladas.

La figura 5.^a es otra fotografía de un rodillo vibrador, de origen inglés, relativamente ligero y autotopulsado.

La fotografía de la figura 6.^a se refiere a un aparato fabricado por una prestigiosa marca sueca. Consiste de un motor diesel de 10 CV, suspendido elásticamente de una base o "trineo", cuyo motor acciona un conjunto que logra una fuerza pulsatoria unidireccional de inclinación variable a voluntad. Esta fuerza es de 4 000 Kg. como máximo, a la frecuencia de 16 hertzios, y merced a actuar inclinada hace que el conjunto del trineo avance o retroceda, según la



Figura 8.^a

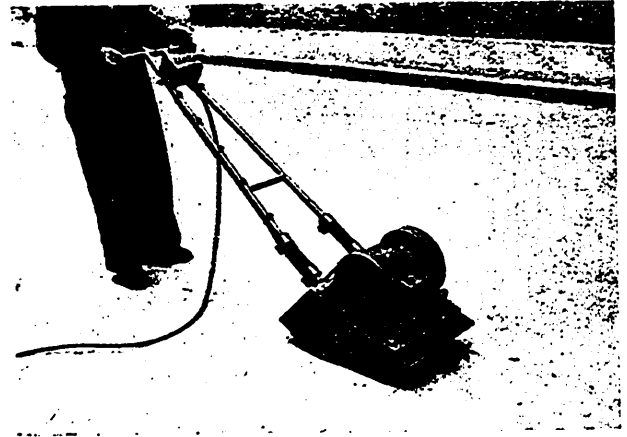


Figura 9.^a

inclinación de la resultante, alcanzando una velocidad de 6 a 8 m. por minuto en horizontal.

También puede remolcarse con un tractor, y así se logra mayor rendimiento en la compactación.

La fotografía de la figura 7.^a corresponde a un compactador eléctrico fabricado en España, utilizado por la Empresa "Sondeos, Inyecciones, Pilotes" (Ingeniero: D. Fernando de Oliveros), con un peso de 450 Kg., una fuerza centrífuga de 3 500 Kg. (a 26 hertzios) y frecuencia vibratoria variable entre 15 y 30 hertzios.

Resulta destacable el hecho de que estos compactadores avancen solos sobre el suelo. Cuando están equipados con vibradores que producen una fuerza giratoria, el sentido de avance del compactador está relacionado con el sentido de giro del vibrador.

Por ello los compactadores eléctricos suelen tener un "inversor" que permite el cambio de sentido muy



Figura 10.

fácilmente, lo cual representa una notable facilidad funcional.

Para pequeñas superficies a compactar, se utilizan aparatos ligeros. La figura 8.^a representa uno de estos aparatos fabricados en Alemania y accionado por motor de explosión. La frecuencia de su vibración es ligeramente regulable entre 7 y 9 hertzios.

La figura 9.^a es un aparato, de fabricación española, que marcha a 24 hertzios: cuando se alimenta por corriente industrial su fuerza es de 800 Kg. co-

Conclusiones.

Se espera haber mostrado, aun cuando de una manera somera, para no fatigar al lector, la extraordinaria importancia que ha tomado la técnica dinámica en la compactación de suelos y en la consolidación de firmes.

Quizá se encuentre esta técnica en fase de formación, como parece deducirse de la diversidad de orientaciones que se aprecian en las características de los diversos equipos que se construyen.



Figura 11.

mo máximo, aun cuando puede reducirse. Al mismo concepto obedece el aparato reseñado en la figura 10 fabricado en Estados Unidos, el cual también tiene motor eléctrico, pudiendo marchar a 75 hertzios, mediante un grupo generador adecuado, y desarrollando una fuerza de 500 Kg. en cada golpe.

Por último, para consolidación de firmes, en la figura 11 se aprecia un bastidor equipado con un motor diesel y con seis bandejas vibrantes, accionadas por el citado motor. En su funcionamiento sustituye totalmente a la apisonadora, y es de fabricación norteamericana.

A pesar de todo, los resultados obtenidos son francamente buenos. Ya se mencionó al principio el caso de los ensanches de la carretera de Barcelona, en los que se aplicaron equipos de una frecuencia inadecuada (50 hertzios), una fuerza centrífuga reducidísima (200 Kg.) y una superficie de contacto entre suelo y vibrador excesivamente grande.

Pues bien, si a pesar de todo los resultados logrados han sido buenos, ¿qué puede esperarse de aquellos casos en los que se aplica una técnica adecuada?

La contestación es clara: un resultado excelente.