

SOBRE LA COMPACTACION DE SUELOS POR VIBRACION

Por FERNANDO OLIVEROS RIVES,
Ingeniero de Caminos.

Se exponen en este artículo los conceptos fundamentales de la compactación de suelos por vibración, proponiéndose tratar el autor en un próximo número los problemas que plantea la práctica de tal sistema.

En el número de esta REVISTA del mes de diciembre apareció un artículo titulado "Compactación dinámica del suelo", firmado por el Sr. Angulo. Por considerar que, aun cuando el problema ha sido desarrollado por el autor desde el punto de vista de constructor de maquinaria, en el mismo aparecen algunos conceptos que precisan aclaraciones complementarias, es por lo que hemos juzgado de interés exponer las siguientes ideas de aspecto teórico. En un próximo artículo nos proponemos exponer otras ideas de tipo práctico acerca de la aplicación de esta nueva técnica.

1. Es relativamente reciente la intervención del hombre sobre el suelo para tratar de modificar sus características y así incorporarlo a la unidad resistente suelo-estructura. El fin que se propone al variarlas es capacitar artificialmente al suelo para incrementar sus aptitudes y eliminar así asientos que pudieran ser incompatibles con la estructura que sobre ellos descansa. Al mismo tiempo, esto le reportará ventajas económicas: unas veces le permitirá mejorar el coeficiente de seguridad; otras, obtener una reducción de la superficie de cimentación, y si se tratara de pilotajes, podría reducir la longitud de aquél.

Hasta hace poco, incluso en Norteamérica, se construían con gran antelación a su explotación los terraplenes del ferrocarril para que asentasen antes de la colocación del balasto; pero el ritmo acelerado de estos últimos años, manifestado en las crecientes velocidades y renovadas exigencias de cargas concentradas en superficie, han obligado al estudio más detenido de la compactación para abreviar el proceso de consolidación.

La técnica de la vibración aplicada a la compactación, si bien se utiliza en algunos países, no puede considerarse, como ya se ha dicho, puesta a punto. En los Estados Unidos es donde más desarrollada se encuentra, y la Universidad de Rutgers, en el Este, y la de Pasadena en California, son los focos de especialización más importantes. La familiarización del técnico con este sistema es tal, que es costumbre fijar *a priori* un valor para la carga de trabajo que habrán de soportar los suelos no cohesivos, y si aquéllos no ofrecen las condiciones previstas, dentro de ciertos límites, se supone que serán obtenidas por medio de la compactación dinámica. En 1952 eran sólo ocho

Estados americanos los que conocían esta técnica; en la actualidad, la mayoría la dominan y están procediendo a la modificación de sus especificaciones vigentes para incorporar estos avances: Rusia, Inglaterra, Suecia, Alemania, etc., practican este tipo de compactación y construyen aparatos. En España venimos esbozando esta técnica desde hace años, si bien de una forma más general, se ha intensificado su desarrollo en la realización de las bases que en nuestro territorio se están construyendo de acuerdo con el convenio firmado con Estados Unidos.

2. Llamamos consolidación al proceso gradual que se origina en un suelo, sujeto a carga, por evasión del agua y gas, circunstancia que simultáneamente obliga a las partículas a incrementar su presión.

Ahora bien, si aceleramos el proceso de la consolidación de una forma artificial, nos encontramos ante el problema de la compactación bajo sus dos aspectos: el sistema que se acostumbra a llamar estático y el dinámico. El primero es de sobra conocido, pero el segundo se trata, como se ha dicho, de una técnica reciente, y a él nos vamos a referir en el presente artículo.

Si nosotros vertemos en un recipiente un suelo no cohesivo procediendo a su vibración por golpeo, pronto veremos que el nivel inicial ha descendido en su interior por efecto de la actuación repetida de la fuerza. Esta idea es la manifestación primitiva de la causa general del tipo de compactación que nos ocupa; así, pues, la compactación por vibración es

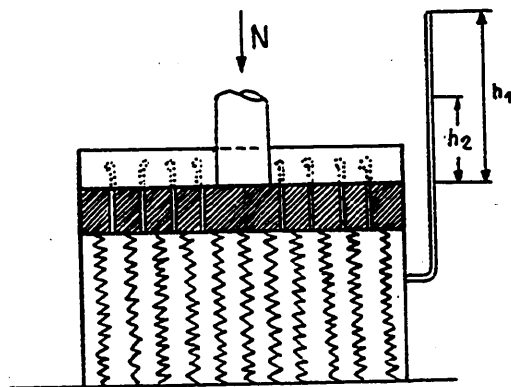


Fig. 1.ª — Analogía de Terzaghi.

una consolidación artificial que se obtiene por medio de la actuación reiterada de una fuerza.

3. Las oscilaciones mecánicas tienen lugar cuando un cuerpo desplazado de su posición estática de equilibrio es accionado por fuerza de vibración, de inercia y reacción; en nuestro caso, es decir, un vibrador situado en contacto con una masa semi-infinita de suelo, la energía la produce el aparato; la inercia es suministrada por la masa del vibrador, más una zona del suelo que participa de su movimiento, y que actúa, por tanto, de muelle, y las fuerzas de reacción se producen como consecuencia de la elasticidad del suelo.

Si nosotros sometemos a una cimentación a régimen vibratorio, podemos comunicarle seis tipos de movimiento, correspondientes a los 6 grados de libertad del sistema: 3 traslaciones paralelas a los ejes principales y 3 rotaciones alrededor de aquellos ejes.

4. Cada tipo de suelo posee sus características dinámicas determinadas y su relación en el proceso de compactación de que tratamos es de fundamental importancia para el estudio e interpretación de los fenómenos físicos desarrollados en el mismo. El conocimiento de aquellas características para el Ingeniero Geomecánico es de análoga importancia que para el proyectista de estructuras lo son las constantes del hormigón o del hierro.

La energía precisa para conseguir la compactación de un tipo de suelo, por medios estáticos o dinámicos, es característica, siendo función del grado de cohesión del mismo, y aunque cualquier suelo puede alcanzar un grado de compactación determinado, tratándolo por uno u otro procedimiento, el mínimo de energía aplicada para obtener aquel estado depende del valor de su cohesión. Fu Shen Fang fué el que primeramente demostró en Varsovia que la energía aplicada a un suelo no cohesivo, para obtener cualquier grado de compactación, es siempre menor aplicando un equipo vibrante que por el sistema estático: en cambio, para suelos cohesivos era menor con el procedimiento estático que con el vibrante.

5. Cuando nosotros aplicamos a un suelo un vibrador en régimen de resonancia, la compactación se efectúa en breves momentos. El fenómeno se produce de la siguiente forma: al iniciarse la vibración, las partículas quedan sujetas a amplitudes y aceleraciones progresivas, en el sentido vertical, horizontal u otras direcciones, que obligan a debilitar su capacidad cohesiva, al tiempo que el efecto de fricción entre las mismas disminuye como consecuencia de la acción de la energía cinética que les anima. La aceleración tiende a anular el esfuerzo cortante, y cuando se produce la resonancia, el suelo prácticamente alcanza el estado de máxima agitación, puesto que las partículas se mueven con las máximas amplitudes, es decir, su máximo desplazamiento absoluto, y entonces, debilitada la resistencia al esfuerzo cor-

tante, las pequeñas tienen la oportunidad de rellenar los huecos existentes entre las grandes.

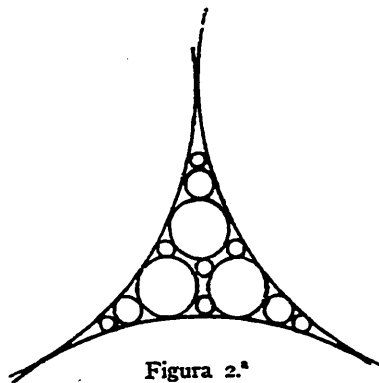


Figura 2.ª

El concepto de fuerza de un compactador ni el de fuerza viva del mismo es de aplicación, pues es la energía, en definitiva, la que hay que comunicar al suelo en ciertas condiciones para conseguir la compactación óptima; así, pues, poco diremos al exigir al aparato que su fuerza sea la mayor posible; lo que sí le exigiremos son unas condiciones específicas de vibración que producirán el máximo de compactación y cuya determinación, según se irá viendo, encierra una gran complicación.

La compactación que nos ocupa tiende, pues, a obtener el máximo de densidad de los suelos no cohesivos, por medio de vibración, y si recordamos la preparación del suelo para efectuar el ensayo Proctor, veremos que, en esencia, aquel sistema sólo trata de reproducir tal práctica, pues al desplazarse sobre el suelo el compactador le va transmitiendo su impacto repetido, lo cual no es más que una reproducción en el campo, de la práctica de laboratorio.

En los suelos cohesivos, generalmente, el por ciento de humedad es mayor que en los no cohesivos, y el valor de la cohesión alcanza magnitudes elevadas, y es por lo que se hace preciso comunicar una gran cantidad de energía al sistema para conseguir la destrucción de los enlaces entre las partículas y expulsión del agua que rellena los huecos, haciéndolo antieconómico por todo ello para aquel tipo de suelos.

Así, pues, queda bien demostrado que el sistema de compactación que nos ocupa no es precisamente el adecuado para la consolidación de firmes en general, quedando restringida su aplicación práctica a los tres campos siguientes:

- a) Suelos no cohesivos.
- b) Suelos medianamente cohesivos.
- c) Grava, macadam y balasto.

Para el tratamiento de los segundos convendrá estudiar económicamente la posibilidad de incorporación de sulfato de sodio para conseguir una disminución de las características cohesivas del suelo correspondiente.

Mogami y Kubo han realizado en la Universidad de Tokio una serie de ensayos con vibración armó-

nica vertical sobre arenas. Los ensayos fueron hechos sobre un modelo de dique de arena cubierto por un estrato delgado de parafina y el suelo se comportaba como un líquido (fig. 3.^a), estando de acuerdo con ciertos fenómenos observados en suelos sujetos a movimientos de tierra. En la figura 4.^a se puede obser-



Figura 3.^a

var el comportamiento fluente del suelo, como consecuencia de un terremoto acaecido en Amasaki en 1951, en donde puede observarse que el parecido es asombrosamente curioso.

6. La interpretación más simple del problema es considerar todo el sistema como una masa puntual vibrante soportada elásticamente con un grado de libertad, es decir, que la máquina con sus elementos son considerados como una simple masa oscilante, reglamentada por la ecuación

$$w_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K \cdot g}{W_1}}$$

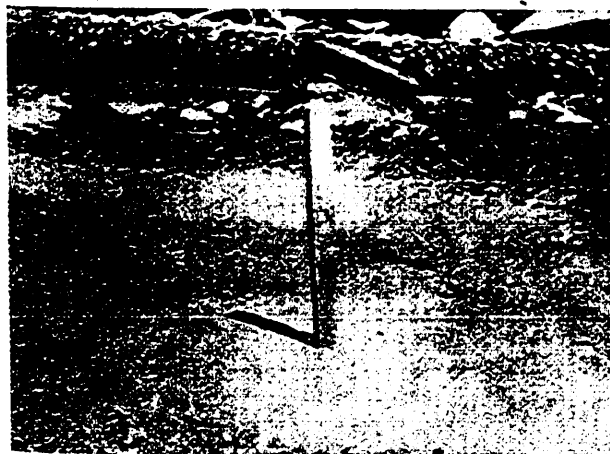


Figura 4.^a

donde:

w_n = frecuencia natural del sistema máquina-muelle.

K = constante del muelle, es decir, la carga necesaria para comprimir el muelle una unidad de longitud.

m = masa de la máquina.
 g = aceleración de la gravedad.
 W_1 = peso de la máquina.

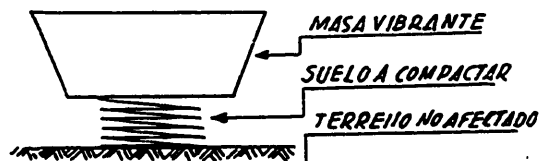


Figura 5.^a

Ahora bien, como los elementos vibradores se colocan directamente, sin interposiciones, sobre el suelo en la forma de la figura 6.^a, aquella fórmula deja de tener aplicación, puesto que en ella se supone que el suelo es perfectamente elástico; no tiene en cuenta el peso del mismo, que hace como se indicó las funciones de muelle y desprecia también el efecto de la forma y tamaño del equipo sobre aquél.

En realidad, la geometría del sistema puede observarse en la figura 7.^a, y en ella vemos que la fuente de energía compensa las pérdidas que se producen por: la falta de elasticidad del suelo, que se opone a la radiación de la energía en su interior; la amortiguación resultante de la fricción entre las partículas al moverse para conseguir acoplamiento, y a las pérdidas hidráulicas naturales.

De lo anteriormente expuesto deducimos que la frecuencia del compactador no deberá coincidir con

la del suelo, sino que éste y el equipo son una unidad vibrante y este conjunto es ya el que deberá poseer la frecuencia de resonancia.

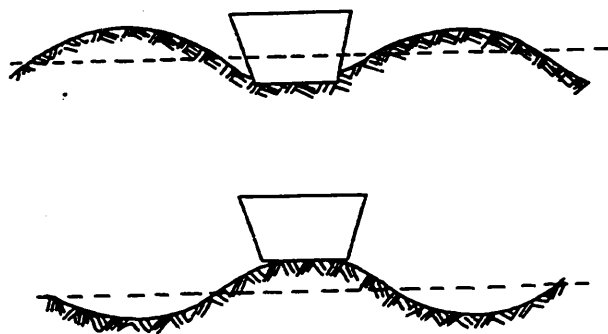


Figura 6.ª

En cuanto a la deducción de las fórmulas que exprese el valor de esta frecuencia, nos conduciría a ocupar mucho espacio, por lo cual prescindiremos de ello y resumiremos lo siguiente: que a pesar de todos los intentos realizados en la actualidad por Winterkorn considerando el suelo como un potencial líquido; por T. I. Sung, suponiendo la cimentación como perfectamente elástica, homogénea e insótropa, así como J. J. Slade y otros, no se ha conseguido despojar al problema de su complejidad general, pues las condiciones de masa de suelo infinita, con características de homogeneidad, elasticidad y amortiguamiento lineales, no se presentan nunca en la realidad; por el contrario, es muy grande el número de parámetros que intervienen en cada una de estas características, por lo cual no existe, hasta el momento, ningún método adecuado que sea capaz de plantear matemáticamente el comportamiento del sistema masa-suelo-vibrador para todas las condiciones posibles. Tenemos que renunciar, pues, al desarrollo matemático o a la analogía dinámica, que pudiera apli-

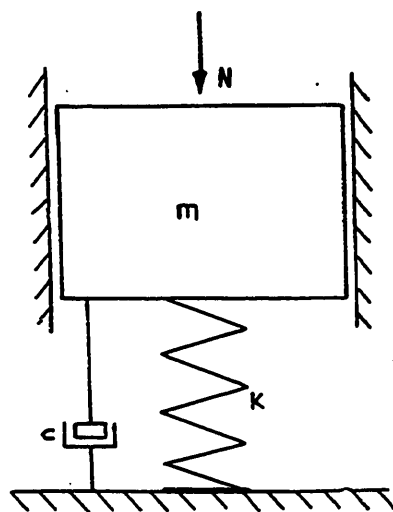


Figura 7.ª

carse para deducir las condiciones de excitación, peso del aparato, fuerza dinámica, superficie de contacto, así como la fijación de la frecuencia de resonancia para determinar las características de onda que producen el máximo de compactación, con lo cual la técnica de la operación quedaría ya muy concreta y además automáticamente la compactación finalizaría cuando el grupo detectase el tipo de onda prefijada.

Sin embargo, estimamos que el planteamiento matemático debe ser encauzado por las orientaciones dadas por Reissner, introduciendo el concepto de dispersión de ondas, con lo cual se puede alcanzar soluciones generales aceptables, próximas a la realidad. Creemos de especial interés la colaboración de la Geofísica en este problema, a la cual queda reservado una gran parte del desarrollo de este campo de investigación en el aspecto de los microseismos.

Por lo que se refiere al aspecto empírico, la fórmula de Converse del CALTECH es muy útil para determinar la frecuencia de resonancia, y aun cuando no influyen todas las circunstancias que pueden presentarse como, por ejemplo, la relación de Poisson, conduce a resultados positivos muy prácticos.

7. La existencia de excentricidades en las máquinas rotativas, motores, turbinas, etc., provocan vibraciones que producen inevitablemente asientos. Muchos desastres de las cimentaciones de estructuras, obras de tierra, pistas de vuelo, oleoductos, etcétera, cimentados sobre suelos no cohesivos, han sido debidos a este defecto. Ahora bien, si la frecuencia de la vibración alcanza el valor específico de la resonancia, el interés del problema se agranda como se ha dicho, ya que los efectos de la vibración se incrementan en proporciones verdaderamente peligrosas. Como la frecuencia de la vibración de la maquinaria en cada caso puede variar entre límites bastante extensos, nuestro problema será producir las vibraciones de una forma prevista para incrementar la capacidad resistente del suelo: provocaremos un asiento del terreno, con objeto de evitar el posterior desarrollo sin control del proceso del mismo, que originaría los daños indeseables.

A continuación figuramos un cuadro con las frecuencias naturales de los suelos que generalmente nos encontramos:

NATURALEZA DEL SUELO	Frecuencia natural c. p. s.
Arena y grava con arcilla	19.4
Antiguo relleno de arena arcillosa ...	21.7
Arcilla terciaria húmeda	23.8
Arena media muy uniforme	24.1
» gruesa uniforme	26.2
» compactada graduada	26.7
Arcilla terciaria seca	27.5
» compacta	28.1
Caliza	30.0
Arenisca	34.0

Estos valores fueron obtenidos por la DEGEBO con un oscilador compuesto por dos masas excéntricas idénticas, diametralmente opuestas, que tienen la particularidad de dar, por tanto, una única componente vertical de la fuerza centrífuga. Naturalmente, los valores del cuadro se dan a título de orientación, pero ya se ve que la desviación que pueda introducirse con su aplicación en la práctica es pequeña.

8. En cuanto a la superficie de contacto del equipo compactador con el suelo, no podemos decir de una forma indeterminada que sea la menor posible, pues llegaríamos a un punto. Por otra parte, ensayos de Eastwood en Escocia han demostrado que no sólo la superficie de contacto influye sobre los efectos producidos, sino que también está ligado con ellos la naturaleza de las cargas y del suelo. Así se deduce que, para cargas ligeras, la frecuencia natural es prácticamente independiente del tamaño de la superficie; para cargas fuertes, la frecuencia natural es inversamente proporcional al ancho de la cimentación. Además, los cuadrados dan frecuencias naturales superiores a los rectángulos de la misma anchura, y los círculos dan frecuencias naturales superiores a los cuadrados circunscritos. Cuando el suelo está inundado, se invierte el sentido de las afirmaciones últimamente expuestas.

El problema de la superficie de contacto, como se habrá podido comprobar en el breve esbozo que hemos hecho, presenta también alguna complicación.

9. La función que queda reservada al agua en el proceso de la compactación dinámica es facilitar la lubricación de las partículas para activar su movimiento relativo y conseguir el encaje de las mismas; cuando se va agregando agua a un suelo, en general, las fuerzas capilares se reducen y las tensiones entre las partículas disminuyen. No vamos a insistir sobre los fundamentos de la densidad Proctor, limitándonos solamente, en este apartado, a la influencia del agua en el aspecto que consideramos.

El factor vibrante permite una reducción del por ciento de humedad, aspecto muy importante cuando se trata de compactar grandes volúmenes de suelos no cohesivos, pues si bien el por ciento de agua a incorporar depende del tipo de suelo, es frecuente cifras próximas al 8 %. Como la reducción del por ciento de agua en la compactación dinámica alcanza cifras próximas al 2 %, se comprenderá que con este sistema se consigue una disminución del volumen de agua a incorporar del orden del 25 %.

Ahora bien, la máxima eficacia de la compactación dinámica no se logra de ninguna manera, como se sabe, en suelos saturados de agua, sino en aquellos que posean el por ciento de humedad que permita obtener la Proctor.

Por otra parte, la relación del agua con este problema ofrece muy variados aspectos, como se desprende de unos ensayos realizados por Tschebotarioff

sobre arenas de Daytona, deduciendo que su resistencia a las fuerzas tangenciales se incrementaba cuando se humedecían; este aspecto es muy importante, ya que puede presentarse como factor negativo en el momento que tengamos que incorporar agua al suelo para conseguir el máximo de compactación, lo cual, inevitablemente, encarecería la operación.

Por lo que respecta a la cohesión en relación con este tipo de compactación, presenta dos aspectos opuestos: el primero consiste en el incremento que la misma puede experimentar como consecuencia de la densidad, y el segundo, la disminución que pueda sufrir debido a que la vibración rompa la cohesión virgen del suelo y la recuperación de la misma, tarde, a veces, mucho tiempo en realizarse. Ambos aspectos conviene tenerlos muy en cuenta analizando con cuidado cuál va a ser el comportamiento del suelo a tratar después de sometido a vibración.

En ocasiones, elementos químicos difícilmente detectables que componen el suelo pueden desarrollar extraordinarios efectos de cohesión; suelos de esta naturaleza, con el 30-40 % de densidad Proctor, poseen resistencias superiores a las obtenidas después de alcanzar el 70 % de la misma. De aquí se deduce que el máximo de compactación no tiene por qué coincidir con el máximo de esfuerzo cortante.

En cuanto a las variaciones que experimenta la densidad en relación con la profundidad influida por la vibración, puede ser del orden de 1.5 veces el ancho del vibrador, aun cuando nosotros hemos conseguido interesar profundidades de 2.5 veces el ancho de aquél. Los alemanes, empleando vibradores de tipo de lanza, han conseguido interesar profundidades próximas a los 20 metros.

10. Los equipos de compactación aplicados para este tipo son, en general, poco pesados por la circunstancia ya citada, y los ligeros poseen la ventaja de que pueden ser autopropulsados, de forma que se mueve unidireccionalmente a velocidades compatibles con la marcha de los trabajos y son insustituibles cuando, por la topografía del terreno, es imposible llevar equipos pesados de compactación estática. Los efectos conseguidos de tal forma son análogos a los obtenidos por cargas estáticas muy superiores, y esta relación alcanza, a veces, valores superiores a 30; por tanto, con cargas relativamente ligeras, podemos obtener efectos similares a los conseguidos por pesados trenes de compactación.

Por último, en cuanto a la posibilidad de lastrar el aparato, no se pueden dar negativas categóricas, pues la amplitud de la vibración sabemos que deberá seleccionarse de acuerdo con la magnitud de los áridos, y ésta obliga a la adopción de un cierto peso del aparato. Por tanto, como cada suelo posee unas determinadas condiciones, convendrá o no lastrar el aparato para conseguir aquélla.