

NUEVA TÉCNICA DE EXTENDIDO Y DENSIFICACIÓN DE MATERIALES GRANULARES PARA CAPAS DE BASES DE PAVIMENTOS

Fredy Alberto Reyes Lizcano*

Ana Sofía Figueroa**

Resumen: la compactación tradicional produce generalmente un "gradiente de densidad", es decir, que la densidad disminuye con la profundidad dentro de la capa compactada, siguiendo una analogía con la ley de Boussinesq. Por esta razón es necesario efectuar controles sobre las capas gruesas de los materiales que conforman la estructura del pavimento con el fin de responder a las exigencias de densificación en el fondo de las interfases entre capas. Un principio de compactación innovador ha sido probado en escala reducida y posteriormente en tamaño real por medio de numerosas máquinas experimentales. Este principio consiste en densificar un material en el momento del extendido aplicando una vibración en la parte inferior de la capa y complementando la compactación en la parte superior por la acción simultánea de una placa vibrante. Los resultados obtenidos a través de los estudios tienen en cuenta la influencia de la geometría, de la vibración, de la velocidad de avance y de la naturaleza de los materiales y permiten hacer un balance del campo de aplicación potencial de este procedimiento y formular las perspectivas de desarrollo del mismo con el ánimo de construir un prototipo industrial.

Palabras clave: extendido, vibración, capa de rodamiento, granulados tratados, compactador de llantas, contenido de agua.

Abstract: Conventional compaction generally creates a density gradient, which means that the density decreases with depth in the compacted layer. As a result, a large number of passes are required on

* Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana, PhD del Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, Francia. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: fredy.reyes@javeriana.edu.co

** Ingeniera civil, Universidad Santo Tomás, especialista en gerencia de construcciones, Pontificia Universidad Javeriana; MSc. en docencia, Universidad de la Salle. Profesora auxiliar especialista y coordinadora de investigaciones, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de la Salle.

thick pavement base layers for densification requirements in the lower parts of the layer to be met. Reduced-scale and full-scale testing of an innovative compactation principle has been carried out using several experimental machines. The principle consists on densifying the material as it is laid by applying vibration to the lower part of the layer and by simultaneously assisting compaction in the upper part of the layer with a vibrating plate. The results, which consider the influence of geometry, vibration, the rate of travel and the nature of materials, allows us to assess the potential scope for applying the process and consider the outlook for developing an industrial prototype.

Key words: Layering, vibration, rolling layer, treated granulates, tired rollers, water content.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque las técnicas modernas de compactación utilizan medios energéticos poderosos, existen sin embargo algunas limitaciones, entre las que se cuentan la dificultad de compactar con eficacia la base de cada capa, lo cual disminuye enormemente el comportamiento de los materiales y la dificultad de compactar eficazmente las capas de espesor superior a 20 cm; esta compactación se debe llevar a cabo, por lo general, con dos capas más o menos pegadas reduciendo la eficiencia estructural de las mismas. Adicionalmente, es necesario disponer de una capacidad portante suficiente sobre la cual se debe extender el material para que se pueda compactar eficazmente.

En la compactación tradicional por vibración sobre la superficie de la capa, los movimientos de los granos del material dependen estrechamente del nivel de esfuerzos aplicados por el compactador. Éstos disminuyen sensiblemente en función de la profundidad una vez se ha superado una decena de centímetros [Quibel, 1992]; así por ejemplo, la capacidad disminuye después de los 10 cm de espesor.

Como resultado de esto se tienen gradientes de densidad en las capas del pavimento. Este artículo presenta una nueva técnica de extendido y de densificación de la capa de base, que pretende evitar los inconvenientes antes mencionados. Esta técnica se basa en el principio según el cual para densificar un material es importante antes que todo acomodar los granos mediante una vibración horizontal y, enseguida, compactarlos mediante una presión vertical. Una presión vertical, aun pequeña, aplicada al material desde el comienzo de la compactación, puede impedir los desplazamientos relativos de los granulares.

2. PRINCIPIO DE DENSIFICACIÓN DEL MÉTODO

El método de densificación estudiado consiste en esparcir el material en una placa inclinada colocada sobre el suelo que vibra horizontalmente. Después de la disposición del material como si fuese una alfombra y el reposo de la misma sobre el suelo, se aplica inmediata-

mente una presión vertical en la superficie que permite la compactación de los centímetros superiores del material. Para facilitar la comparación de los mecanismos de densificación de materiales mediante métodos tradicionales y mediante este nuevo método, se puede examinar el caso de materiales granulares bidimensionales de forma triangular. La Figura 1 muestra que en el extendido de los materiales éstos se distribuyen según una posición aleatoria y pueden reposar sobre el suelo, sobre la base o en altura.

2.1. DENSIFICACIÓN POR EL MÉTODO TRADICIONAL DE COMPACTACIÓN

La compactación tradicional se ejerce sobre la superficie de la capa. El compactador vibratorio ejerce sobre las capas granulares una fuerza cuya componente vertical es más grande que la componente horizontal. El material granular puede bloquearse rápidamente como consecuencia de los esfuerzos insuficientes básicamente en profundidad, que no permiten el reagrupamiento y, por consiguiente, se obtiene una densificación insuficiente.

2.2. DENSIFICACIÓN POR EL NUEVO MÉTODO (ESPARCIMIENTO Y COMPACTACIÓN)

Con el método propuesto los materiales se disponen sobre una capa que reposa sobre una placa metálica y que vibra horizontalmente antes de ser colocada en el suelo. La vibración horizontal de la placa metálica tiende a colocar a las gravas tratadas en una posición ordenada estable. Esta grava reposa entonces en la base y no en sus picos (Figura 1). La segunda capa inferior permanece en una posición estable pero la acción de la vibración permite la colocación del material granular de esta capa dentro de los espacios dejados por la primera capa, y así mismo para las capas sucesivas. Finalmente se obtiene la disposición del material presentada en la Figura 2.

Figura 1. Posición de los granulares luego del extendido

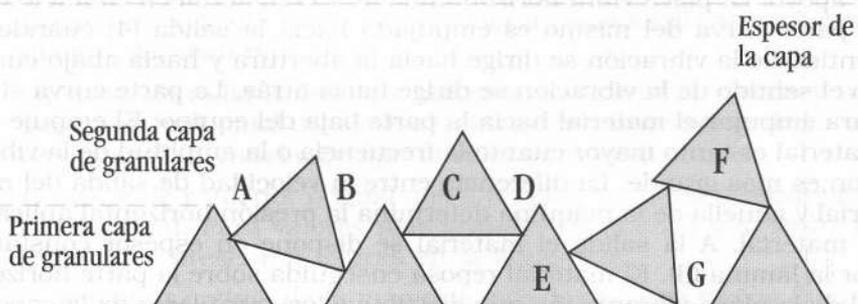
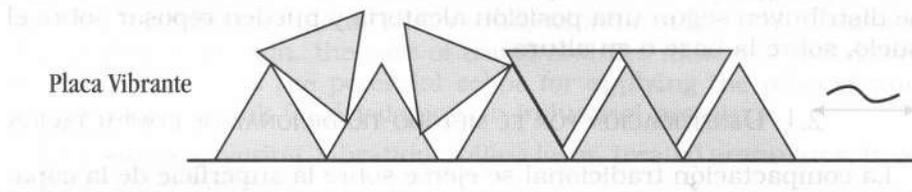


Figura 2. Arreglo de la primera y segunda capa de granulares



De esta manera, el material granular se dispone uno al lado del otro pero no ha sido completamente compactado para obtener una buena densidad, así que se debe aplicar una presión sobre éste. La presión horizontal se obtiene mediante la presión del material ocasionada por el equipo de extendido. La presión vertical se ejerce por el dispositivo de compactación que actúa en la superficie. La acción de la vibración en la base hace subir los granulares más grandes hacia la superficie. La compactación en superficie puede alcanzarse mediante los medios clásicos de compactación.

Así las cosas, el método tradicional de densificación de capas podría llamarse *densificación por compactación*, presionando el material para colocarlo en su nueva posición, mientras que la nueva técnica que se presenta se podría llamar *densificación por ordenamiento, arreglo y acomodamiento de los materiales*.

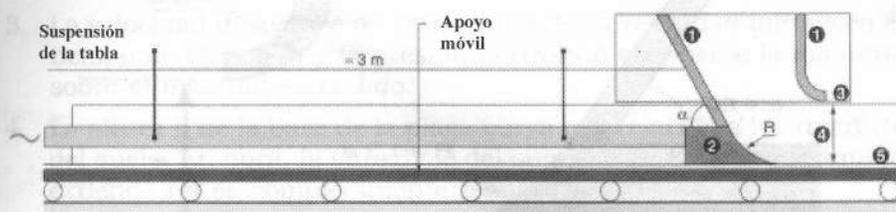
3. CONCEPCIÓN DE LA MÁQUINA

La máquina concebida para la nueva técnica de densificación se muestra en la Figura 3. La máquina se compone de una tolva dentro de la cual se coloca el material que cae sobre la placa vibrante (2). Esta placa se compone de una parte curva de radio R prolongada en su base por una lámina horizontal (5) de longitud L que reposa sobre el suelo de apoyo. La placa vibra horizontalmente y el material en contacto con la parte curva del mismo es empujado hacia la salida (4) cuando el sentido de la vibración se dirige hacia la abertura y hacia abajo cuando el sentido de la vibración se dirige hacia atrás. La parte curva sirve para empujar el material hacia la parte baja del equipo. El empuje del material es tanto mayor cuanto la frecuencia o la amplitud de la vibración es más grande. La diferencia entre la velocidad de salida del material y aquella de la máquina determina la presión horizontal aplicada al material. A la salida el material se dispone en espesor constante por la lámina (3). El material reposa enseguida sobre la parte horizontal de la placa vibrante (5), que distribuye los granulares de la capa.

La tolva se compone de placas en *plexiglás* formando paredes verticales e inclinadas (1). La placa vibrante se une a la tolva mediante

barras verticales y puede ser desmontada, lo cual permite la modificación de su forma. Las barras de fijación vertical permiten que la placa vibre horizontalmente sin desplazamiento vertical debido al peso del material. Con el fin de simplificar su realización, la máquina se fija y el material se extiende sobre un soporte móvil que simula el suelo.

Figura 3. Esquema del montaje de la máquina de extendido fija y del soporte móvil



4. ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS ÓPTIMAS PARA UNA BUENA DISPOSICIÓN O DESPLAZAMIENTO DEL MATERIAL DENTRO DE LA MÁQUINA

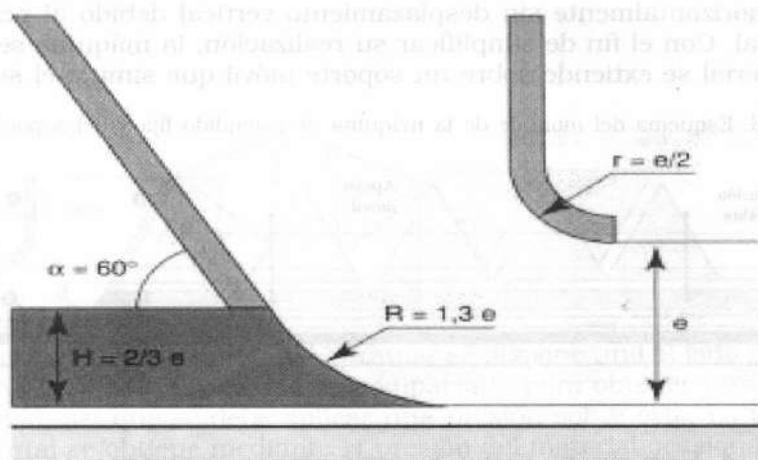
Un modelo de la máquina reducido a la mitad permite un extendido de ancho pequeño (15 cm) para compactar una capa de 15 cm. El objetivo del ensayo es obtener el perfil que mejor se adapte para tener un buen flujo del material dentro de la máquina. Los estudios se definieron en función del espesor de la capa, de los valores óptimos de la altura H y del radio R de la placa, del ángulo α para un adecuado desplazamiento del material y del radio r para una mejor nivelación de la superficie (Figura 4). Algunos de estos valores están relacionados entre sí como por ejemplo los valores de R , H y α .

Es posible, entonces, obtener las siguientes conclusiones:

1. Para una altura H de la placa curva igual a $2/3$ del espesor de la capa se obtiene la mejor elección para densificar la capa tanto en la parte superior como inferior para asegurar un flujo constante del material.
2. Un ángulo α de 60° se puede considerar como ideal para el deslizamiento del material.
3. La curva de radio R debe ser tangente a la pared inclinada y a la superficie horizontal del suelo al nivel del punto de salida de la capa de material extendida. Se fija un valor de R igual a $1,3e$.
4. Un valor de r inferior o igual a $e/2$ permite un buen deslizamiento del material. Para valores más grandes en la capa que se ha extendido se presentan fisuras en la superficie.

La geometría óptima de la máquina para lograr una buena fluencia de los materiales se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Perfil óptimo de la máquina para una buena fluencia de los materiales



5. EXPERIMENTOS REALIZADOS

Los experimentos para probar la máquina concebida se llevaron a cabo, por una parte, con un modelo a escala 1:2 en el Laboratorio de Puentes y Caminos (LCPC) para probar la eficacia de esta nueva técnica y para determinar los parámetros de funcionamiento, y por otra parte, con un modelo a escala 1:1 en el CER de Rouen para representar condiciones muy similares a las de obra.

5.1. EXPERIMENTOS A ESCALA 1:2

En ellos se estudió especialmente la influencia de las características del funcionamiento de la máquina (frecuencia y amplitud de vibración, velocidad de avance) sobre la densificación de los materiales en la capa repartida. En dicho experimento, después del extendido se mide la densidad en función del espesor de la capa con la ayuda de un banco gamma móvil. La precisión de la medida es mejor que el 1%.

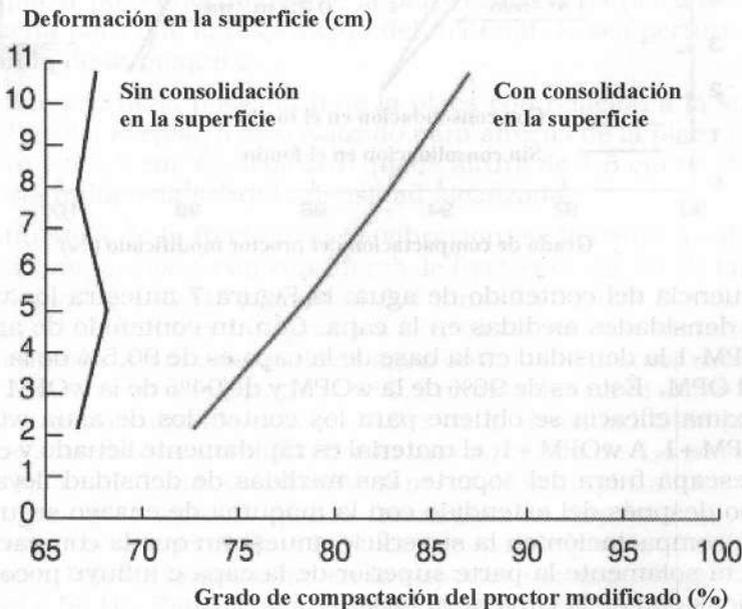
Como materiales se probaron grava y arena. Para la grava, teniendo en cuenta la escala de reducción de la máquina del ensayo y el hecho de que las gravas utilizadas en la obra son de 0/20 mm, se escogió para los ensayos una grava de 0/10mm. Para obtener una grava difícil de compactar se utilizó una grava sílico calcárea completamente triturada con arenas de diorita trituradas de la cantera (clase DC3). A su vez, la arena utilizada se compone de 60% de arena silícea y de 40% de arena triturada de 0,2 mm au. Para la grava las características del proctor modificado óptimo son $r_{d\text{ opm}}$ igual a 2,165 t/m³ y humedad óptima de 6,6%. Para la arena, las características del proctor modificado óptimo son $r_{d\text{ opm}}$ igual a 1,790 t/m³ y humedad óptima del 7%.

La densificación del material repartido *a priori* depende de:

1. La longitud de la placa vibrante L que se encuentra en la base de la capa. En efecto, a medida que esta longitud es más grande, el tiempo de la vibración del material es más largo.
2. La frecuencia f y la amplitud de la vibración; estos dos factores influyen en el empuje del material hacia la salida de la máquina y por consiguiente en el volumen del material compactado.
3. La velocidad de avance de la máquina. Esta velocidad influye en el tiempo de vibración y la presión horizontal que ejerce la máquina sobre el material extendido.
4. La altura h de la base de la placa curva con relación a la superficie del suelo. En obra, la superficie del suelo sobre la cual la máquina extiende no es completamente plana.

Para comparar la eficacia del nuevo método con la del método tradicional se hizo un ensayo testigo consistente en esparcir manualmente el material sobre el soporte móvil y compactarlo en la superficie por intermedio de un compactador mecánico liso y liviano que tiene una masa del orden de 3 kg por centímetro de generatriz. La densidad del material se mide enseguida en función de la profundidad de la capa que se compactó inicialmente (Figura 5). El ensayo se realizó con una frecuencia de 50 Hz y una amplitud de vibración de 1,4 mm.

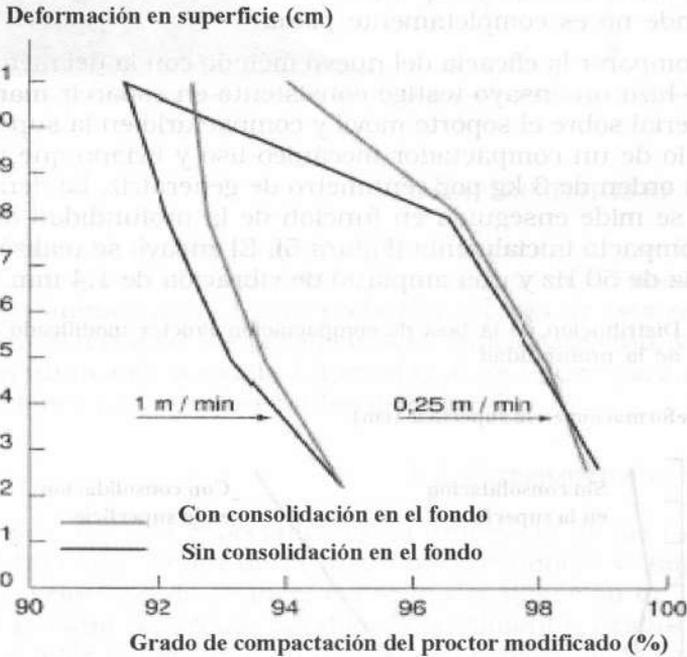
Figura 5. Distribución de la tasa de compactación Proctor modificado en función de la profundidad



Algunos de los hallazgos del experimento fueron:

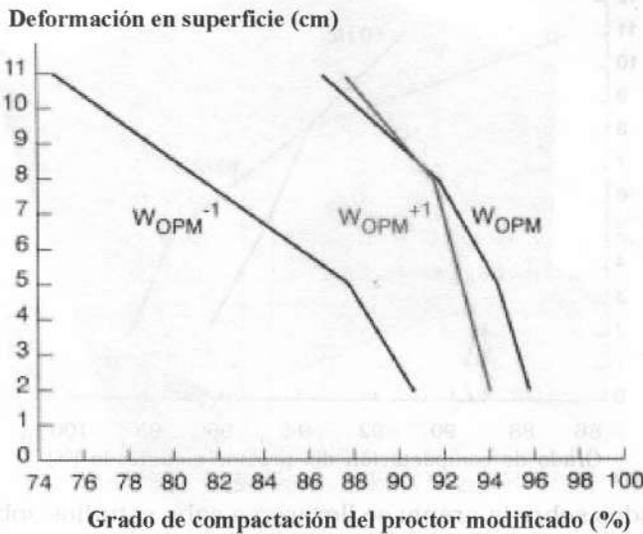
- Influencia de la velocidad de extendido: los ensayos fueron realizados con una velocidad de extendido de 0,25 m/min o de 1m/min. La velocidad de extendido lenta se realizó únicamente para el ensayo del contenido de agua óptimo del material. A la velocidad de 0,25 m/min, la densidad obtenida en la base es del 99% de la densidad OPM y a 1m/mm es del 95%. La velocidad tiene, entonces, una influencia grande sobre las densidades (Figura 6). Para facilitar el flujo de material para el resto de los ensayos se fijó la velocidad en 1m/min. Esta velocidad es comparable a obtener en obra un rendimiento de 300 t/h en 3,5 m de ancho extendido.

Figura 6. Influencia de la velocidad de extendido sobre la densidad del material



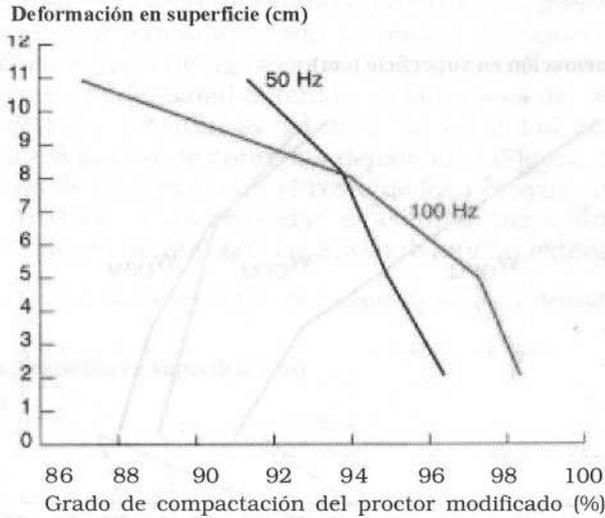
- Influencia del contenido de agua: la Figura 7 muestra los valores de densidades medidas en la capa. Con un contenido de agua de wOPM-1 la densidad en la base de la capa es de 90,5% de la densidad OPM. Ésta es de 96% de la wOPM y de 94% de la wOPM +1. La máxima eficacia se obtiene para los contenidos de agua wOPM y wOPM +1. A wOPM +1, el material es rápidamente licuado y el agua se escapa fuera del soporte. Las medidas de densidad llevadas a cabo después del extendido con la máquina de ensayo seguida de una compactación en la superficie, muestran que la compactación afecta solamente la parte superior de la capa e influye poco sobre la densidad de la capa de la base.

Figura 7. Repartición de las tasas de compactación para distintos contenidos de humedad



- Influencia de la longitud de la lámina horizontal de la base de la capa: parece ser que la longitud de la lámina horizontal no tiene ningún efecto significativo sobre la densificación. Esto se puede explicar por el hecho de que la parte curva de la placa es muy pequeña para que la disposición del material no sea perturbada a la salida de la máquina.
- Influencia de la posición h de la placa con relación a la superficie del suelo: el ensayo fue realizado para alturas de la placa iguales a cero y a 1,5 cm; se demostró que la altura de 1,5 cm no tiene ninguna influencia sobre la densidad alcanzada.
- Influencia de la frecuencia de vibración: se llevaron a cabo ensayos comparativos con vibradores de frecuencia de 50 Hz (amplitud 1,4 mm) y 100 Hz (amplitud 0,6 mm). La Figura 8 muestra las densidades obtenidas para los dos casos con los materiales extendidos con un contenido de agua óptimo del proctor modificado. A 100 Hz, con una amplitud de 0,6 mm, la densidad obtenida en la base de la capa alcanza el 98,5% de la densidad OPM mientras que aquella que tiene 50 Hz con una amplitud de 1,4 mm alcanza el 96,5 % de la densidad OPM. A pesar de la amplitud más débil de vibración se aprecia que la frecuencia es importante para aumentar la densidad en la base de la capa. Se puede también notar que a 100 Hz la densidad en la superficie es menor que la densidad a 50 Hz. Esto es, sin embargo, irrelevante dado que la densificación en superficie se puede llevar a cabo sin dificultad mediante las técnicas tradicionales.

Figura 8. Repartición de la densidad para dos frecuencias distintas de vibración



- Resultados sobre la arena: se llevaron a cabo estudios sobre la arena con varios contenidos de agua. Para cualquiera que sea el contenido de agua, la densidad en la base de la capa no supera el 88% de la densidad OPM. Se puede concluir que este método no se adapta a las capas que tienen material granular fino.

5.2. EXPERIMENTOS A ESCALA 1:1

El objetivo de estos experimentos fue compactar una capa a un nivel de densidad elevado de forma simultánea con la operación de extendido, con un volumen compatible o que se asemeja al de las centrales de producción de materiales de bases de pavimentos (gravas recompuestas humidificadas, gravas-escorias, gravas-cemento).

El dispositivo del ensayo es parecido a la máquina de la escala 1:2. El material se recibe continuamente dentro de una tolva suspendida a un portador que asegura el desplazamiento lento en traslación a medida que se realiza el extendido, como se aprecia en la Figura 9. En la salida una compuerta permite regular el espesor de la capa; las láminas laterales aseguran el confinamiento de los materiales sobre una distancia apropiada.

Los ensayos se realizaron con dos tipos de dispositivos; en el primero de ellos se utilizó la máquina experimental construida en el CECP de Angers, destinada para ser colocada en el extendedor de materiales del CER y alimentada continuamente por las bandas transportadoras desde la central de fabricación de materiales. El dispositivo se fija al cajón del extendedor por medio de cuatro cadenas que tienen en cuenta el grado de libertad horizontal para la vibración. La posición para la altura de la base de la placa se fija a 2 cm por encima del suelo soporte del ensayo. La placa de aproximación es tangente a la superficie del suelo.

Figura 9. Esquema del dispositivo de ensayo en verdadera magnitud

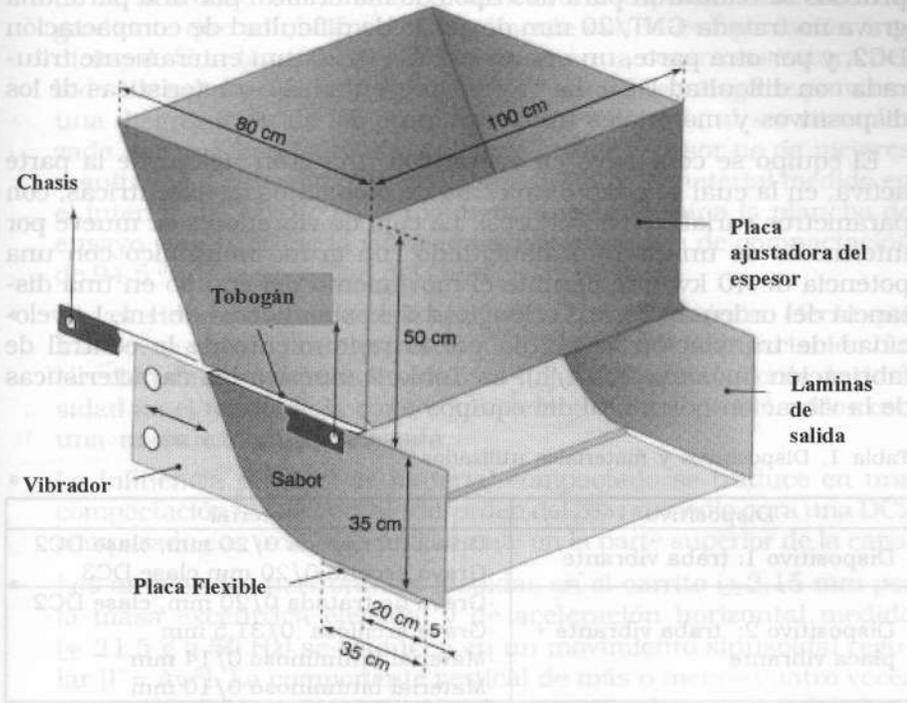


Figura 10. Extendido de una grava con formaleta lateral de 1 m de longitud



El segundo dispositivo utiliza una placa y una traba vibrantes. Las pruebas se realizaron para dos tipos de materiales; por una parte una grava no tratada GNT/20 mm de grado de dificultad de compactación DC2, y por otra parte, una grava-escoria 0/20 mm enteramente triturada con dificultad DC3. La Tabla 1 presenta las características de los dispositivos y materiales utilizados.

El equipo se construyó en acero, con una gran rigidez de la parte activa, en la cual se adaptó una caja de momentos de excéntricas, con parámetros variables (vibradores). La caja de vibradores se mueve por intermedio de un circuito alimentado con grupo hidráulico con una potencia de 40 kw que permite el movimiento del equipo en una distancia del orden de 20 m. La longitud del extendido es de 1m. La velocidad de translación se regula por el rendimiento de la central de fabricación (máximo 200 t/h). La Tabla 2 muestra las características de la vibración horizontal del equipo.

Tabla 1. Dispositivos y materiales utilizados

Dispositivo	Material
Dispositivo 1: traba vibrante	-Grava no tratada 0/20 mm, clase DC2 -Grava escoria 0/20 mm clase DC3
Dispositivo 2: traba vibrante + placa vibrante	-Grava no tratada 0/20 mm, clase DC2 -Grava arcillosa 0/31,5 mm -Material bituminoso 0/14 mm -Material bituminoso 0/10 mm

Tabla 2. Características de la vibración horizontal de la máquina

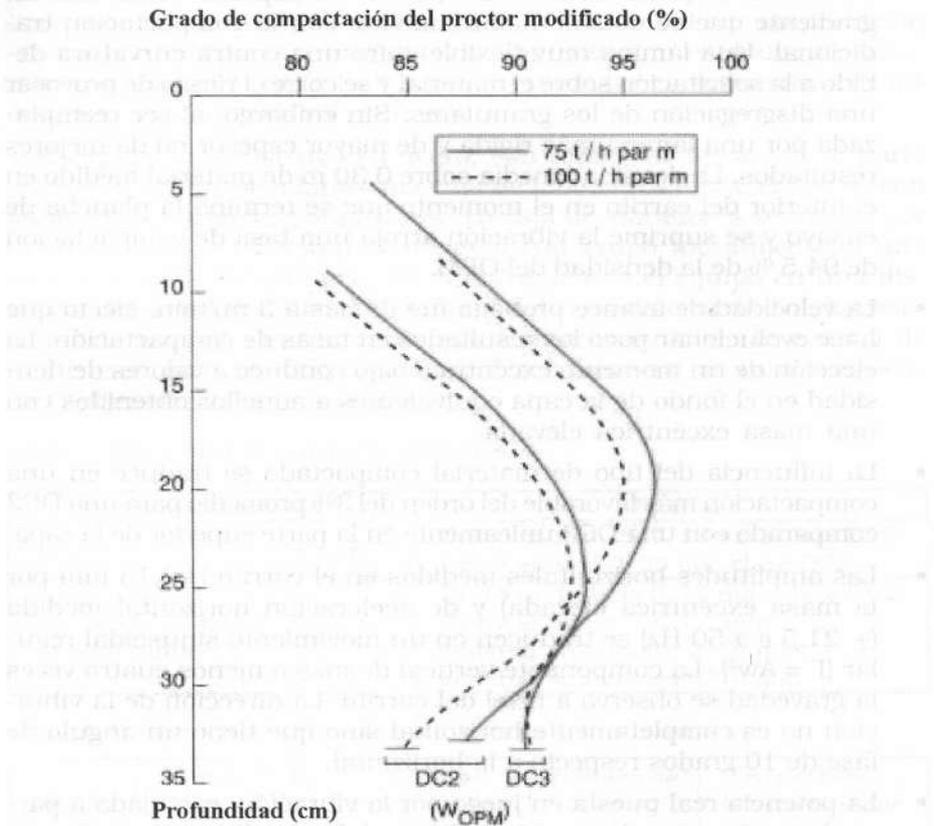
Opción	Momento de excentricidad (m.kg)	Amplitud teórica Ao (mm)	Frecuencia máxima (Hz)	Aceleración teórica máxima (g)
1	1,4	± 2,8	50	± 28,2
2	0,625	± 1,25	75	± 28,3

Los ensayos efectuados muestran que:

- No hay problema de flujo del material en el extendido. En el caso de la amplitud más elevada y para la frecuencia máxima admisible por la caja de vibradores el material sale en exceso. Para obtener el espesor deseado la velocidad de translación debe ser superior a 1 m/mm.
- El funcionamiento con la tolva de recepción desacoplada del carrito vibrante (que no vibra con éste) es la opción preferida para la salida del material. Las diferentes constataciones que se llevaron a cabo muestran que la salida del material es adecuada a lo largo del carrito.
- Es necesario contener lateralmente el material extendido sobre una distancia del orden de 1 m, para evitar los desmoronamientos laterales del material repartido y compactado provocado por las aceleraciones residuales en el interior del material.

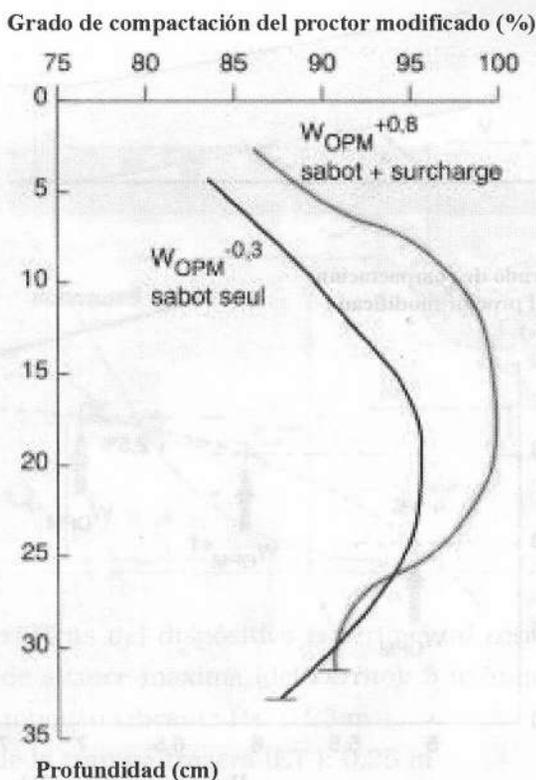
- Las tasas de compactación obtenidas se sitúan entre el 83% y 89% de la densidad de OPM medida sobre el espesor total, con un gradiente que se obtiene habitualmente con la compactación tradicional. Una lámina muy flexible sufre una contra curvatura debido a la solicitación sobre el material y se corre el riesgo de provocar una disgregación de los granulados. Sin embargo, al ser reemplazada por una lámina más rígida y de mayor espesor no da mejores resultados. La densidad media sobre 0,30 m de material medido en el interior del carrito en el momento que se termina la plancha de ensayo y se suprime la vibración arroja una tasa de compactación de 94,5 % de la densidad del OPM.
- La velocidad de avance probada fue de hasta 3 m/min, efecto que hace evolucionar poco los resultados en tasas de compactación. La elección de un momento excéntrico bajo conduce a valores de densidad en el fondo de la capa equivalentes a aquellos obtenidos con una masa excéntrica elevada.
- La influencia del tipo de material compactado se traduce en una compactación más favorable del orden del 3% promedio para una DC2 comparado con una DC3 únicamente en la parte superior de la capa.
- Las amplitudes horizontales medidas en el carrito ($\pm 2,15$ mm por la masa excéntrica elevada) y de aceleración horizontal medida ($\pm 21,5$ g a 50 Hz) se traducen en un movimiento sinusoidal regular ($\Gamma = A\omega^2$). La componente vertical de más o menos cuatro veces la gravedad se observa a nivel del carrito. La dirección de la vibración no es completamente horizontal sino que tiene un ángulo de fase de 10 grados respecto a la horizontal.
- La potencia real puesta en juego por la vibración, calculada a partir de parámetros de presión y de caudales medidos en el circuito hidráulico, es de 16 kw para la excéntrica elevada a 50 Hz. Referido al peso unitario del material extendido y compactado, la energía suministrada es de aproximadamente 450 julio/kg en el caso de un rendimiento más elevado que equivale a 130 t/h/m.
- Se confirma entonces que el modo de compactación es bien diferente al tradicional ya que desarrolla esfuerzos intergranulares elevados. La presión máxima medida a nivel de la pasada delante del carrito es solamente del orden 35 kpa. Se alcanza efectivamente el principio de la densificación por vibrocompresión, con la diferencia de que el material no está confinado dentro de la masa y que la transmisión de aceleraciones entre la pared activa y el material no es eficiente. La aceleración horizontal que se revela en el seno del material a la derecha de la trampa de salida de la tolva es de 5 a 6 x g (para 21, 5 x g sobre la pared del carrito). (Figura 11).

Figura 11. Influencia del material sobre la tasa de compactación ($a=0,9$ mm, $f=75$ Hz)

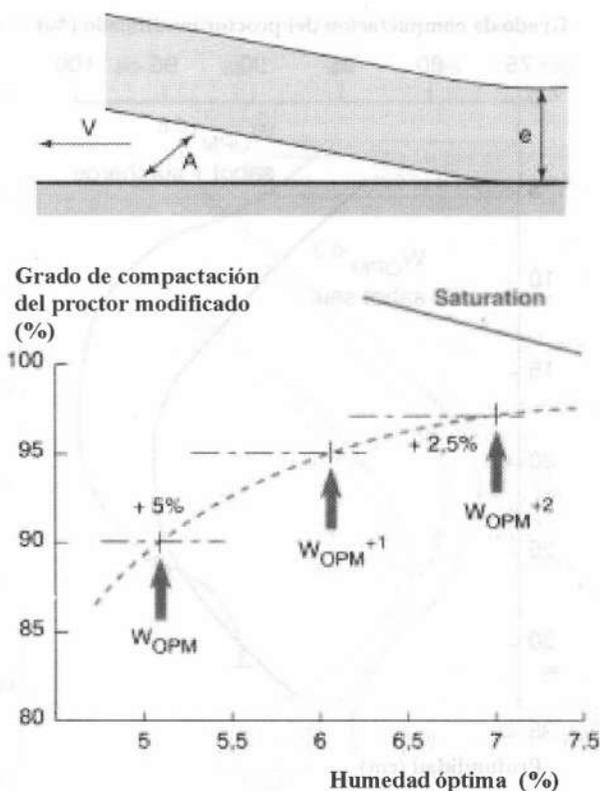


- La continuación de la compactación a partir del nivel de densidad realizado por este procedimiento se puede hacer con un compactador clásico y permite llegar a los niveles de densificación usuales.
- Para mejorar la compactación de la mitad superior de la capa, la más alejada de la parte activa, se ha probado el aporte de una sobrecarga estática del orden de 5 kpa colocada a la salida de la compuerta sobre una longitud de 0,20 m. El resultado en densidad se mejoró notablemente en la parte superior de la capa. Una tasa de compactación de 100% de rd OPM se alcanza entre los 15 y los 20 cm de profundidad. Sin embargo, es necesario señalar que el contenido de agua del material probado es más elevado ($w_{OPM}+1$) por encima de esta plancha. No se observó una incidencia en cuanto al escurrimiento del material. La energía se aumenta en este caso en un 10% para la vibración del tobogán bajo parámetros idénticos (Figura 12).

Figura 12. Adición de una carga estática en la parte superior ($a=0,9$ mm, $f= 75$ Hz)



- El contenido de agua del material tiene un efecto muy importante sobre la densificación obtenida, como se ha podido observar dentro de los ensayos realizados con una máquina experimental (Figura 13), que tenía un fondo plano ligeramente inclinado (tobogán) animado por una vibración en una dirección controlada [Reyes, 1988]. Con este procedimiento se demostró que se pueden obtener densidades muy elevadas en el fondo de la capa pero que una acción complementaria en la parte superior es igualmente necesaria para asegurar la densificación homogénea de la capa. Por el contrario, sobre el fondo activo, la densificación elevada se obtiene muy rápidamente con respecto a la operación del depósito del material sobre el suelo que lo soporta. La curvatura impuesta por la placa de disposición sobre el suelo produce también esfuerzos cortantes. Estos resultados han conducido a investigar los medios para aumentar la eficacia del procedimiento para ser empleados directamente en obra buscando un contenido de agua igual a W_{OPM} y para continuar los ensayos con el procedimiento de tipo tobogán.

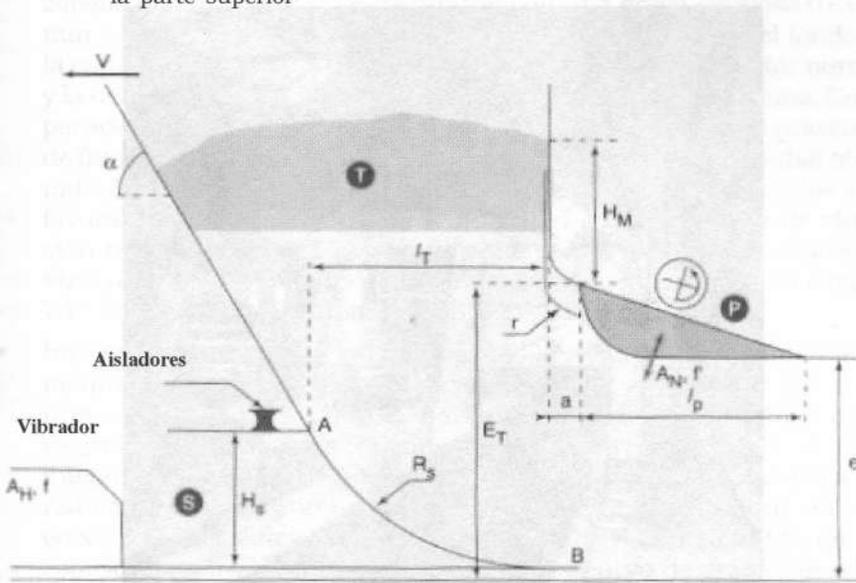
Figura 13. Influencia del contenido de agua ($a=0,85$ mm, $f= 50$ Hz)

5.3. FASE II DE ENSAYOS A ESCALA 1:1

Los ensayos a escala real se continuaron con una nueva máquina experimental construida por el CER y equipada con un dispositivo complementario de compactación de la parte superior de la placa. Esta segunda fase del ensayo tenía como objetivo obtener una compactación eficaz de 0,30 m sobre todo el espesor de la capa, estudiar la influencia del material (naturaleza y contenido de agua) sobre el nivel de densificación alcanzado y obtener los rendimientos de puesta en obra elevados compatibles con los valores observados en las obras.

Para ello se colocó una placa vibrante P (Figura 14) en la parte superior de la tolva. El dispositivo de fijación permite la compactación en la superficie con la placa cualquiera que sea la densidad adquirida previamente por el material. La masa de la placa vibrante S se reduce de manera que se disminuya el consumo de energía con respecto a los primeros ensayos. La tolva ambulante de almacenamiento del material —que se llena antes de comenzar el ensayo—, de 2 toneladas por 8 metros es tirada por un tobogán de velocidad modulable.

Figura 14. Esquema y procedimiento de la compactación con una placa vibrante en la parte superior



Las características del dispositivo experimental son:

- velocidad de avance máxima (del carrito): 5 m/min
- altura del tobogán vibrante H_s : 0,23 m
- apertura de la trampa trasera (ET): 0,35 m
- ancho de la pasada L_T : 0,37 m
- masa del tobogán y de los vibradores: 140 kg (350 kg/m)
- momento de excentricidad de los vibradores: 0,09 mkg (0,23 mk kg/m)
- amplitud horizontal del carrito: +/- 0,65 mm
- amplitud vertical del tobogán: +/- 0,20 mm
- frecuencia de vibración: 50 a 100 Hz
- potencia vibratoria máxima del tobogán 3,5 Kw (9 kW/m)

La placa vibrante tiene una vibración multidireccional (con un solo vibrador) y como características iniciales se resaltan las siguientes:

- ancho y largo: 0,40 x 0,30 m
- masa: 40 kg
- presión estática: 3,3 kPa
- momento de excentricidades: 0,045 mkg
- amplitud teórica: +/- 1,1 mm
- amplitud vertical real sobre el material: +/- 1,4 a 2 mm
- frecuencia de vibración: 50 a 100 Hz

Figura 15. Extendido de un material del tipo grava bitumen



Por razones de un comando único del convertidor de frecuencias, la frecuencia de vibración de la placa es idéntica a aquella del carrito vibrante.

Entre los resultados obtenidos se destacan:

- Aporte de la placa vibrante en la parte superior: los ensayos confirman la acción en la parte superior de la placa complementaria a aquella del carrito vibrante que actúa principalmente en la parte inferior de la capa. Al parecer la eficacia del dispositivo se podría mejorar con un funcionamiento a 100 Hz a nivel del carrito y aun más, a una frecuencia reducida de 50 Hz a nivel de la placa vibrante permitiendo a esta última una amplitud real superior al 25%. La placa vibrante tiene un modo de funcionamiento por impacto distinto del modo de funcionamiento del carrito vibrante (ver Tabla 3). Los valores de la densidad en el fondo de la capa son sensiblemente mucho más elevados en el caso del carrito vibrante asociado a una placa vibrante (éstas alcanzan el nivel exigido para la calidad q1) que en el caso del carrito solo. Este resultado se puede atribuir a la acción sensible de la placa vibrante en profundidad y al contenido de agua inferior a la WOPM de la plancha de ensayo con el carrito solo.

- **Influencia del material:** otros ensayos realizados sobre una grava clasificada de tipo DC2 se ejecutaron con una grava arcillosa 0/31,5 mm (clasificación GTR B5h). Con 100 Hz, la densidad en el fondo de la capa obtenida es del 95% de la densidad óptima del proctor normal y la densidad media del 91,1% de esta misma densidad óptima. Comparado con un material granular limpio se observa que la presencia de finos arcillosos disminuye notablemente el nivel de densidad obtenido. Los resultados de la compactación absoluta son bajos; los más favorables que se obtuvieron se lograron a la frecuencia de vibración más elevada (60Hz) y no alcanzan en el fondo de la capa sino 80% para la GB y 85% para el BB, y en promedio en toda la capa el 73% para la GB y 80% para el BB.
- **Influencia de la velocidad de avance:** la máquina experimental se modificó para esta fase del ensayo. Se colocó un vibrador que daba una amplitud más grande. Esta vez el sistema fue alimentado eléctricamente de manera independiente y reemplazó al vibrador inicial que se había montado sobre la placa vibrante. Las características del carrito no fueron modificadas. Se observa que en una grava TLH de dificultad de compactación DC3, extendida en un espesor de capa de 0,30 m, presenta una curva de gradiente vertical, $\rho_d = f(z)$. Las tasas de compactación promedio obtenidas se presentan en la Tabla 4. Éstas muestran un decrecimiento importante de la eficacia entre 1 y 3,5 m/min. Con la grava no tratada DC2 a WOPM - 0,5%, se obtiene, para una velocidad de avance de 1m/min, una densidad media de 94,1% de la densidad óptima del OPM con un máximo del 98% a 10 cm de profundidad. Las irregularidades del funcionamiento se manifestaron en particular con la aparición de una componente vertical de la aceleración del orden del 30% en la componente horizontal que conduce, por tracción repetida y fatiga sobre las suspensiones, a la rotura de las piezas impidiendo de esta manera la continuación del ensayo. Parece, pues, que con el dispositivo modificado con el segundo vibrador sobre la placa vibrante superior se obtiene, para la amplitud más elevada, una eficacia mayor para la densidad media; sin embargo, la presencia de la placa es más eficaz en cuanto más próxima se encuentre al carrito vibrante.

Tabla 3. Influencia de la placa vibrante (Grava DC2 - Espesor 0,30 m)

	Procedimiento			
	Carrito (solo)		Tobogán y placa vibrante	
Contenido de agua	W _{OPM} - 0.7		W _{OPM} + 0.2	
Frecuencia en (Hz)	102	55	102	49
P _{dmoy} / ρ_{dOPM}	77,6	74,1	91,1	92,0
P _{dfc} / ρ_{dOPM}	90,1	85,7	98,8	93,2

Tabla 4. Tasa de compactación promedio

Contenido de agua	$W_{OPM} + 0.6$	$W_{OPM} + 0.6$	$W_{OPM} - 0.4$
Velocidad de avance (m/min)	1,0	3,5	5,0
Pdmoy / ρ_{DOPM} (%)	92,1	86,5	85,4

6. CONCLUSIONES

El estudio sobre el modelo reducido permite fijar o precisar las dimensiones que mejor se adaptan para una nueva máquina de extendido y de densificación para usar en la base de las capas del pavimento. El estudio permitió fijar las condiciones de funcionamiento de la máquina a la velocidad de avance, frecuencia y amplitud de vibración. Es de notar que para obtener una buena densificación en la base de la capa, la vibración debe encontrarse dentro de un plano paralelo a la superficie sobre la cual se extiende el material.

La experimentación en escala real llevada a cabo confirma el interés técnico del nuevo método de extensión-compactación de una capa de material granular. El estudio muestra que una densificación elevada de la capa extendida puede ser obtenida asociando al carrito vibrante una compactación de superficie.

El campo de utilización apropiado comprende los materiales granulares, gravas no tratadas, gravas tratadas y capas con ligantes hidráulicos, en espesores puestos en obra comprendidos entre 20 y 35 cm. Los materiales que tienen una cohesión (presencia de finos arcillosos) o un ligante viscoso —un bitumen, por ejemplo, al igual que las arenas— no se pueden compactar eficazmente. El carrito crea una densificación en el fondo de la capa que puede ser elevada (nivel q1) bajo ciertas condiciones. A la salida del carrito el material no se densifica debido a la interferencia de la vibración del carrito con la placa vibrante en la parte superior y cuando la vibración horizontal no presenta componente vertical. La placa vibrante finaliza completamente la densificación de la mitad superior de la capa. Una densidad media de nivel q3 (98,5% de la densidad del óptimo Proctor normal), pudo ser obtenida sobre una grava no tratada de clase DC2.

Estos dos resultados provienen de ensayos con velocidad de avance de 1m/min, para 0,30 m de espesor, lo que corresponde a un rendimiento de 100 t/h para un extendido de 2,50 m de ancho.

El dispositivo puede ser mejorado si se efectúan las siguientes acciones:

- Asegurar una mejor eficacia del carrito minimizando la componente vertical de la aceleración.
- Optimizar la distancia entre la placa vibrante y el carrito, asociando una segunda placa detrás de la primera para alcanzar una densidad mayor próxima de la calidad q2 (97% de la densidad del proctor óptimo modificado).

- Aumentar la amplitud del carrito a un valor comprendido entre un valor +/- 1 a 1,5 mm.
- La competitividad energética con respecto a la compactación tradicional realizada con cilindros vibrantes no puede ser obtenida si no se tiene un nivel de densificación elevado en el fondo de la capa. Una precompactación con el procedimiento correspondiente a uno o dos pases de cilindro vibrante modificaría la composición de los equipos para terminar la compactación.
- La influencia del contenido de agua del material sobre la eficacia de la densificación es grande, tal como sucede en la compactación clásica, y aun probablemente es más acentuada. Es necesario tener en cuenta el contenido de agua de extendido que es ligeramente superior a WOPM (entre WOPM y WOPM + 1%).
- La homogeneidad de los resultados dentro del perfil ha sido siempre satisfactoria, y la unión parece regular, pero serían necesarios ensayos sobre bandas mucho más largas que aquéllas con las que se ha hecho el ensayo.

REFERENCIAS

- Comité Français pour les Techniques Routières (s.f.), Certificado de rendimientos de los materiales viales: compactadores.
- NGUYEN, D. C. (1976), Machina de compactage en laboratoire d'éprouvettes de graves traitées aux liants hydrauliques, en: *Bulletin de Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 86, 85-92.
- NGUYEN, D. C., H. Q. Nguyen, K. N. Doung (1988), Design and Testing of Fan Innovative Machine for Spreading, Precompacting and Compacting of Road Materials. Conference Internationale de la route et de la circulation Routière "Route et circulation Routière pour l'an 2000", Berlin, pp. 95-99.
- NGUYEN, D. C., J. L. Gourdon, L. F. Reyes, M. L. Galleene (1988), Compactage en une seule passe des asises de Chaussés. Conférence Internationale de la Route et de la Circulation Routière "Routes et Circulation Routière pour l'an 2000", Berlin, pp. 129-133.
- NGUYEN, D.C., J. Mulders (1990), Étude de la compacité limite et de la difficulté de compactage des mélanges granulaires a la machina de vibrocompresion a paramètres contrôles, en: *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 169, pp. 49-63.
- Patente de invención número 84 13440, 30 de agosto de 1984.
- Patente de invención número 85 12830, 28 de agosto de 1985. Anexo.
- QUIBEL, A. (1991), Modelisation pratique du compactage par vibration, en: *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 192, pp. 27-35.
- SETRA-LCPC (1992), *Guide technique. Realisation des remblais et des couches de forme*. Fascicule 1, 100 pages; fascicule 2, 104 pages.

REYES, F. A. (1988), Mise en oeuvre des couches de chaussées. Étude de la faisabilité de répançage a haute compacité des couches épaisses. Thèse de Doctorat de Génie Civil, Université de Nantes.