

ESTUDIO DE LA DENSIFICACIÓN DE MATERIALES TRATADOS CON LIGANTES HIDRÁULICOS BAJO VIBRACIÓN HORIZONTAL

Fredy Reyes¹

María Teresa Molina²

Sandra Valencia³

Abstract

The study of vibrating effects over treated materials has developed a characterisation of optimum ranges in which every mix can reach specified density effects. The analysis made of these types of mixes shows the reological behaviour under amplitude and frequency variations a few seconds after the application of the given parameters. However, after applying these parameters, the gained compactness is almost zero.

El uso de medios distintos de aplicación de la vibración por ejemplo, utilizando vibración horizontal, puede alcanzar mejores resultados que si es aplicada en superficie como usualmente lo hacen los compactadores.

Palabras Claves

Vibración Horizontal, Molde, Materiales Hidráulicos, Experimentación.

INTRODUCCIÓN

Dentro del campo investigativo de los procesos de compactación de materiales para pavimentos, son pocos los estudios que se han realizado para el análisis de los efectos de densificación que se obtienen con la aplicación de parámetros energéticos por medio de vibración horizontal. Los resultados encontrados con este método en Francia en el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, y los obtenidos en Colombia en el CITEC (Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico, de la Universidad de los Andes), muestran la efectividad de este proceso, lo que abre las puertas a nue-

vos procedimientos de compactación que pueden llegar a competir con los procesos tradicionales de compactación vertical por encima aplicados en todo el mundo.

El estudio de efectos vibrógenos sobre materiales tratados con ligantes hidráulicos, ha permitido la caracterización de rangos óptimos para los cuales en cada una de las mezclas se pueden lograr los efectos de densificación especificados. El análisis realizado a este tipo de mezclas muestra el comportamiento reológico bajo variaciones de amplitudes y frecuencias a pocos segundos de la aplicación de dichos parámetros, luego de los cuales la ganancia en compacidad es casi nula.

¹ Profesor Asistente, Universidad de los Andes

² Estudiante de Magíster, Universidad de los Andes

³ Estudiante de Magister, Universidad de los Andes

Considerando que uno de los factores que garantiza la vida útil de una vía es el grado de compactación de las capas que conforman el pavimento, se hace necesaria la profundización de los efectos producidos por nuevos métodos de compactación para la optimización del proceso constructivo.

Desde años atrás los métodos tradicionales de compactación se han adaptado a las necesidades y condiciones de las cargas colombianas, cumpliendo con los requisitos suficientes para su aplicación. Sin embargo, se requiere la presencia de nuevas técnicas que generen competencia, optimicen los procesos y se adapten a las características ambientales y de los materiales existentes en nuestro país.

Este artículo presenta los resultados obtenidos para la compactación de materiales tratados con ligantes hidráulicos por medio de la aplicación de vibración horizontal. Es un proceso novedoso, que no se ha empleado aún en el mundo y su investigación comenzó hace unos años en Francia. Los resultados allí obtenidos permitieron observar que la vibración horizontal es más eficaz que la vertical, pues permite la obtención de mayores tasas de compactación.

La compactación de un material es un proceso mecánico de reordenamiento de las partículas que lo constituyen, con el fin de disminuir los vacíos. Esta disminución de los vacíos implica una disminución en el volumen del material, haciéndose más resistente a la aplicación repetida de cargas, lo que se manifiesta en una baja generación de deformaciones plásticas. Así mismo, la compactación aumenta la impermeabilidad del suelo y aumenta su resistencia a la ruptura.

La compactación se puede realizar por compactación estática, por impacto, por amasado ó por vibración.

1. MODELO FÍSICO

Considerando el estudio de la compactación por medio de vibración se hace necesaria la aplicación de conceptos físicos referentes al comportamiento de estos efectos. La vibración es el movimiento periódico de un sistema alrededor de su posición de equilibrio. Es un movimiento que se reproduce idéntico a sí mismo después de un intervalo de tiempo, denominado período.

La mayor parte de las vibraciones utilizadas en mecánica son del tipo armónico. Estas se caracterizan por una función sinusoidal:

$$x = A \sin(\omega t)$$

Donde, $x =$ Amplitud de la vibración
 $A =$ Amplitud máxima
 $\omega =$ Pulsación del movimiento

Esta corresponde a la ecuación de una vibración no amortiguada. Una vibración tal no existe realmente, pero muchos de los fenómenos físicos se pueden aproximar por esta ecuación.

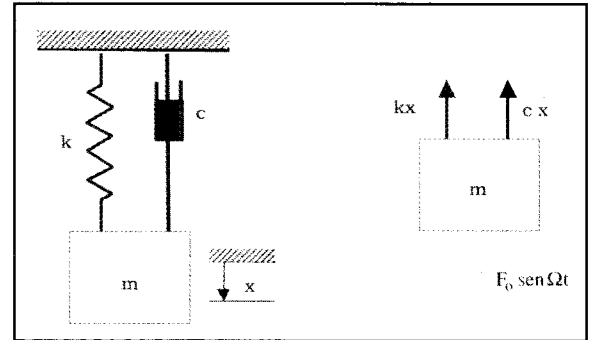


Figura 1

Sistema con amortiguamiento viscoso bajo excitación armónica

$$\dot{x} = \omega A \cos(\omega t) = \text{Velocidad del movimiento}$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \sin(\omega t) = \text{Aceleración del movimiento}$$

Un sistema oscilatorio de un grado de libertad se puede representar como se indica en la figura. El grado de libertad está descrito por el eje x , que indica la posición de la masa m . El sistema consiste en una masa y un resorte, con amortiguamiento viscoso y excitado por una fuerza armónica $F_0 \sin \Omega t$.

La ecuación del movimiento, obtenida del diagrama del cuerpo libre es:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f_0 \sin \Omega t$$

donde,

$$F_r = kx = \text{Fuerza ejercida por el resorte}$$

$$x = \text{Desplazamiento relativo entre los dos extremos del resorte}$$

$$F_i = -m\ddot{x} = \text{Fuerza inercial en el cuerpo debido a la aceleración}$$

$$F_a = c\dot{x} = \text{Fuerza ejercida por el amortiguador}$$

complementaria, la cual es la solución de la ecuación homogénea y la integral particular.

La solución homogénea muestra que la amplitud del movimiento disminuye exponencialmente con el tiempo:

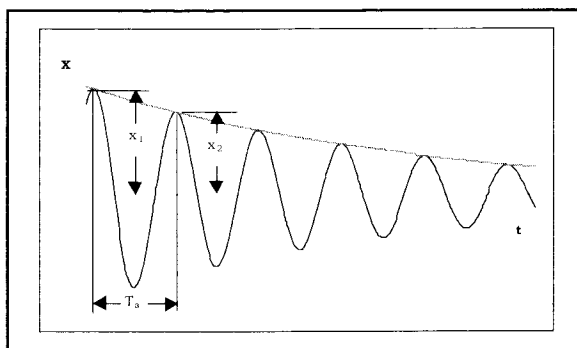


Figura 2

Decaimiento de la amplitud con el tiempo en un sistema excitado armónicamente, con amortiguamiento viscoso.

$$x(t) = e^{-\xi \omega t} \left[x_0 \cos(\omega_a t) + \left(\frac{V_0 + \xi \omega x_0}{\omega_a} \right) \sin(\omega_a t) \right]$$

La ecuación particular describe un fenómeno clásico de resonancia. Cuando el coeficiente de amortiguamiento crítico ξ es igual a cero y la relación entre frecuencias (Ω/ω), es igual a la unidad, el denominador de la ecuación es cero y por lo tanto la amplificación se convierte en infinito (Figura 3).

$$x = \frac{\left(\frac{F_0}{k} \right)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)^2 \right]^2 + \left[2\xi \left(\frac{\Omega}{\omega} \right) \right]^2}} \quad y$$

$$\tan \phi = \frac{2\xi \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)^2}$$

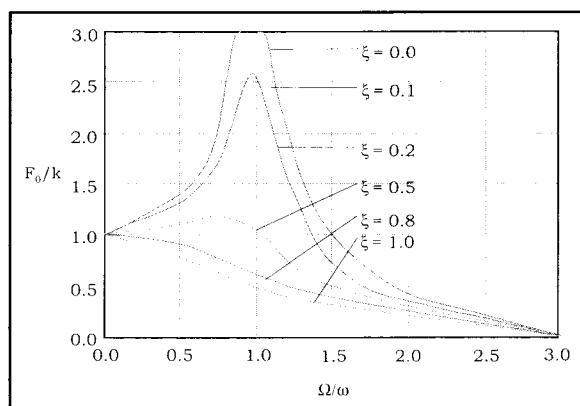


Figura 3

Amplificación dinámica

Básicamente las vibraciones se caracterizan por cuatro parámetros energéticos (frecuencia, amplitud, aceleración, energía) relacionados por las siguientes ecuaciones fundamentales:

$$\begin{aligned} F &= 1/T &= &\text{Frecuencia} \\ \omega &= 2\pi F &= &\text{Velocidad angular} \\ V &= \omega A = 2\pi F A &= &\text{Velocidad máxima de una partícula} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Gamma &= \omega^2 A = (2\pi F)^2 A = 4\pi^2 F^2 A &= &\text{Aceleración máxima de una partícula} \\ E &= m / \left(8\pi^2 \right) (\Gamma / F)^2 &= &\text{Energía mecánica de la vibración} \end{aligned}$$

Para compactar un material se requiere de una energía suficiente, que se puede traducir por la relación aceleración/frecuencia, la cual se debe adaptar al tipo de material a compactar, a su consistencia, al espesor de la capa, la dimensión de los granos, etc. Sin embargo, la energía de vibración no es el único parámetro a considerar. Se deben también tener en cuenta otros parámetros, que están ligados al movimiento vibratorio (frecuencia, tiempo de vibración) y al material (cantidad de finos, cantidad de agua, la naturaleza del ligante y la granulometría de los materiales).

El comportamiento reológico es la forma como se efectúa la deformación de un cuerpo bajo los esfuerzos a los cuales ha sido sometido.

Cuando se compacta una mezcla por vibración ésta última induce en la mezcla fuerzas alternativas que provocan un desplazamiento de los granulares, anulando las uniones recíprocas. Si la vibración es suficiente, el material toma entonces las características de un líquido. Una vez las fuerzas de fricción desaparecen los granulares tienden a juntarse bajo su propio peso y se produce la densificación.

Para el desarrollo de la presente investigación fue necesario realizar dos fases: una teórica (consulta bibliográfica) y una práctica.

La fase investigativa consistió en la búsqueda de las características de los materiales, las dosificaciones que deberían emplearse y la determinación de los parámetros

tros energéticos bajo los cuales se aplicaría la vibración horizontal.

2. FASE EXPERIMENTAL

MATERIAL	FR (Hz)	AMP.(MM)
GCV	75	0,5
	100	0,5
	75	3
	50	1
GE	50	0,5
	100	0,4
	130	0,5
	160	0,4
GC	50	2
	50	3
	75	2
	75	3
C	100	0,4
	130	0,4
	160	0,4

TABLA 1

Parámetros energéticos aplicados a cada material.

Existen estudios realizados en el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en Francia, en donde se muestran dosificaciones y parámetros energéticos que fueron adaptados a los ensayos realizados.

Para la fase práctica se realizaron ensayos de laboratorio, utilizando un equipo de vibración que consta de un molde de acero de 60 cm de largo, 50 cm de alto y 40 cm de ancho, con una pared móvil, a la que se adaptó un gato hidráulico para la aplicación de la vibración.

Los materiales analizados presentan diferentes granulometrías. Estos materiales se ensayaron realizando variaciones de amplitud y frecuencia para la obtención de parámetros efectivos para cada una de las mezclas.

MATERIAL	%
Cemento	14.55
Filler	2.17
Arena 0/4.76	37.27
Grava 4.76/12.5	18.23
Grava 12.5/19	23.42
Agua	4.36
Relación A/C	0.3

Dosificación para la Grava cemento.

MATERIAL	%
Cemento	3.80
Arena 0/4.76	45.90
Grava 4.76/12.5	27.24
Grava 12.5/19	17.35
Agua	5.70
Relación A/C	1.5

Dosificación para la Grava Ceniza Volante.

MATERIAL	%
Ceniza volante	12.1
Arena 0/4.76	31.56
Grava 4.76/12.5	36.63
Grava 12.5/19	13.21
Agua	6.5
Relación A/CV	0.5

Dosificación para la Grava Escoria.

MATERIAL	%
Escoria	14.2
Arena 0/4.76	33.04
Grava 4.76/12.5	27.18
Grava 12.5/19	20.08
Agua	5.5
Relación A/E	0.38

Los materiales ensayados y sus dosificaciones fueron los siguientes:

Dosificación para el concreto.

Los parámetros energéticos de frecuencia y amplitud para cada una de las mezclas fueron aplicados para tiempos de 45 seg. y 100 seg., con el fin de determinar la densidad producida por la vibración horizontal con la variación del tiempo y con la variación de la distancia a la pared vibrante.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

La medición de la variación del asentamiento del material se realizó mediante palos medidores colocados en la parte superior del molde.

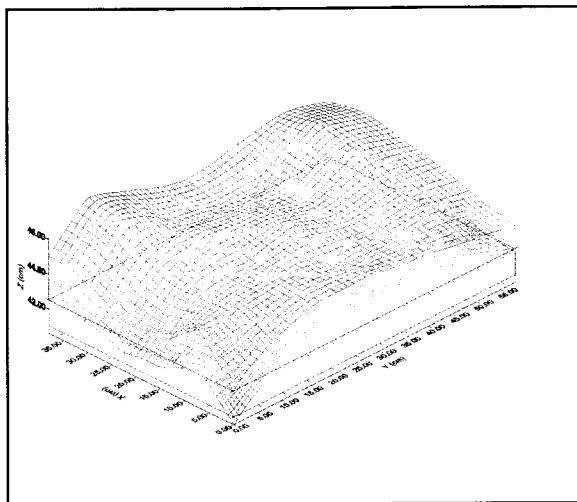


Figura 4.
Variación del material al aplicar amplitudes y frecuencias para 45 y 100 segundos. (Grava Escoria)

MAT	FR Hz	AMP mm	Dens Inicial gr/cm3	Dens 45" gr/cm3	Dens 100" Gr/cm3
GCV	75	0,5	1.87	1.89	1.90
	100	0,5	1.87	1.89	1.90
	75	3	1.87	2.08	2.10
	50	1	1.87	2.11	2.15
GE	50	0,5	1.71	1.85	1.87
	100	0,4	1.71	1.80	1.84
	130	0,5	1.71	1.82	1.83
	160	0,4	1.71	1.83	1.83
GC	50	2	1.69	1.86	1.87
	50	3	1.69	1.99	1.99
	75	2	1.69	1.95	1.96
	75	3	1.69	1.91	1.94
C	100	0,4	1.97	2.28	2.34
	130	0,4	1.97	2.34	2.36
	160	0,4	1.97	2.27	2.37

TABLA 2
Densidades para 45 seg y 100 seg (a 4cm de la pared vibrante)

MATERIAL	FR (Hz)		AMP (mm)		Dens 45" (gr/cm3)	Dens 100" (gr/cm3)
GCV	50	BAJA	1	ALTA	2.11	2.15
GE	50	BAJA	0,5	ALTA	1.85	1.87
GC	50	BAJA	3	ALTA	1.99	1.99
C	160	ALTA	0,4	BAJA	2.27	2.37

TABLA 3
Densidades compactas obtenidas para la combinación óptima de amplitud y frecuencia para cada materia

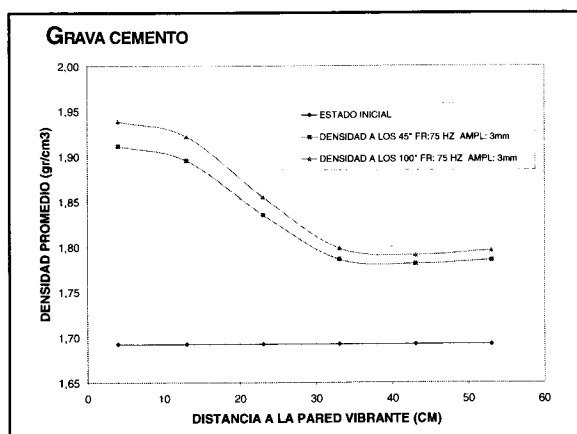


Figura 5
Variación de la densidad con la distancia a la pared vibrante

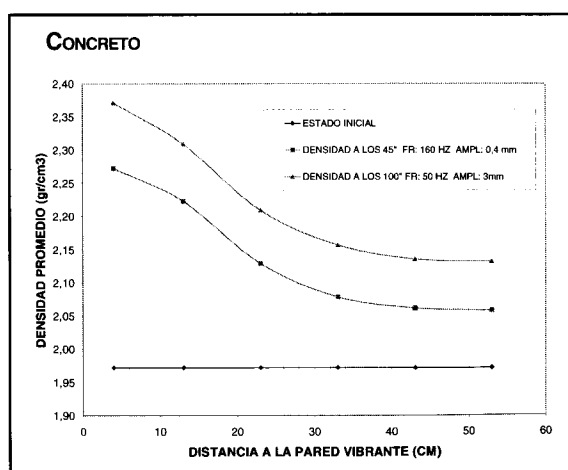


Figura 8
Variación de la densidad con la distancia a la pared vibrante

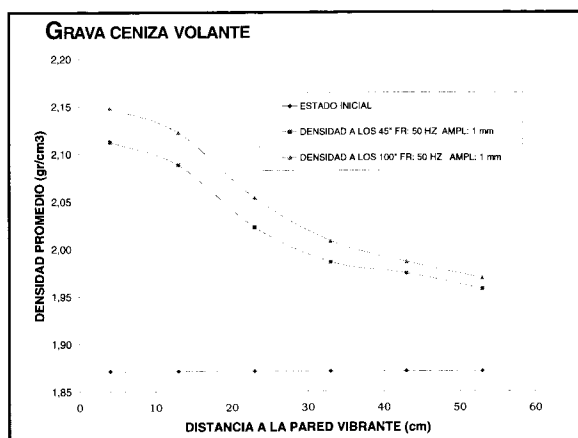


Figura 6

Variación de la densidad con la distancia a la pared vibrante

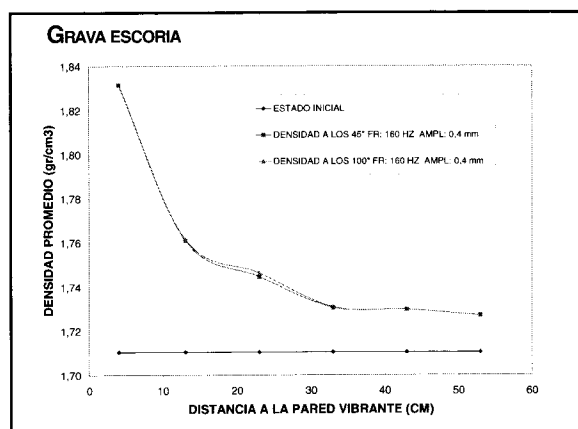


Figura 7

Variación de la densidad con la distancia a la pared vibrante

MATERIAL	γ_s	γ_c	t	F	Γ	A
GCV	1.69	1.85	45	50	19.7	2
GE	1.71	2.11	45	50	4.9	0.5
GC	1.87	1.99	45	50	9.9	1
C	1.97	2.34	45	160	40.4	0.4

TABLA 4

Parámetros energéticos óptimos para cada material

Con los resultados obtenidos se determinó la efectividad de la densificación de los materiales por medio de la vibración horizontal.

A partir de los resultados obtenidos se observa que los

parámetros energéticos requeridos para compactar cada material son muy diferentes.

γ_s = Densidad suelta (gr/cm³)

γ_c = Densidad suelta (gr/cm³)

t = Tiempo (seg)

F = Frecuencia (Hz)

Γ = Aceleración (x g)

A = Amplitud (mm)

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Con la realización de este estudio se han llegado a las siguientes conclusiones:

1. La efectividad de los parámetros energéticos empleados se ve reflejada principalmente en el sector más cercano a la pared vibrante, donde las densidades compactas son mayores y van disminuyendo gradualmente a medida que se aleja de dicha pared. Esta disminución se produce de forma asintótica y es diferente para cada material, dependiendo de los valores de frecuencia y amplitud que se apliquen.
2. Con los resultados obtenidos para las diferentes mezclas realizadas, se pueden determinar radios de acción efectivos para una óptima densificación de los materiales tratados con ligantes hidráulicos. Para los ensayos realizados es de 13 cm aproximadamente, dado que es a esta distancia de la pared vibrante que se producen los mayores aumentos de densidad.

Después del radio de acción eficiente de la vibración, los aumentos en densidad son menores debido a la transformación de una parte de la energía emitida por el vibrador en calor y al amortiguamiento propio de los materiales que origina disminuciones en la amplitud de las vibraciones con la distancia.

3. Las variaciones de densidad con respecto al tiempo, se presentan en mayor medida en los primeros segundos de aplicación de los parámetros energéticos, lo que nos indica que no es necesario una aplicación prolongada de dichos efectos vibrógenos para la obtención de resultados óptimos de densidad. Esto es importante ya que es posible optimizar el rendimiento de los equipos para minimizar los costos de construcción de vías.

4. Cada material requiere de parámetros energéticos diferentes, sin embargo existe una similitud entre la grava ceniza volante, la grava cemento y la grava escoria, los cuales requieren de valores de frecuencia bajos.

En contraposición, el concreto además de altos valores de frecuencia requiere bajos valores de amplitud para lograr mayores valores de densidad compacta. Con esta combinación de parámetros se logran valores de energía relativamente bajos, pero en todo caso la frecuencia óptima para un mismo valor de amplitud corresponde a la más alta.

5. Para la densificación de materiales como la grava cemento y la grava ceniza volante, se requieren amplitudes altas, entre 1 y 3 mm, a diferencia del concreto y la grava escoria, que requieren amplitudes del orden de los 0.4 y 0.5 mm.
6. El efecto de la frecuencia es inversamente proporcional al aumento de la densidad, pues para mayores frecuencias se obtuvieron menores valores de densidad, excepto para el concreto, en el cual al aumentarse la frecuencia entre 100 Hz y 160 Hz se obtuvieron densidades finales de 2.344 y 2.371 gr/cm³ respectivamente.

REFERENCIAS

1. GASCUEL 1973 *Energie necesarie pour le serrage des mélanges granulaires*, Memoire d'ingenieur réalisé au LCPC Nantes, CUST Clermont Ferrand, 1985.
2. GOMEZ JURADO Jaime, *Compactación del Concreto por vibración*, Revista Noticreto No. 34, Diciembre 1994.
3. MACHET J.M. *Intérpretation de léfficacité des compacteurs vibrants*, Rapprot de Recherche LPC, No 59 Septiembre 1976.
4. PERROCHEAU, *Rhéologie et serrage des mélanges granulaires*, memories d'ingénieur CUST Clermont-Ferrand, Junio 1986.
5. REYES LIZCANO Fredy A., *Mise en oeuvre des couches de chaussées etude de la faisabilite de repandage en haute compacite des couches epaisses*. Toboggan, 2 Septembre 1988.