

## **Experiencias en el Uso y Abuso de Vibrocompactadoras para la Densificación de Materiales Granulares Cementados y no Cementados**

*Ing. Roberto Centeno Werner.*

*Centeno Rodríguez & Asociados. Ingenieros Consultores.  
Profesor de Post Grado en el Departamento de Vías de Comunicación  
en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.  
Caracas - Venezuela  
email: centenow@cantv.net*

### **RESUMEN**

Se presenta un método práctico y sumamente sencillo para medir en obra la frecuencia de vibración de los equipos que se utilizan para densificar capas de suelos granulares cementados y no cementados; incluyendo gravas, arenas gravosas, piedra procesada en equipos picadores, mezclas de concreto asfáltico en caliente, mezclas de grava cemento y combinaciones de arena con limo y algo de arcilla. Se destaca la poca efectividad de los rodillos vibratorios en la densificación de las arcillas de mediana y alta plasticidad.

Se describen los instrumentos conocidos con el nombre de tacómetros y se explica la manera de utilizarlos en obra. Se trata sobre la existencia de armónicos que pueden confundir al inspector al realizar las mediciones con los tacómetros, haciendo la presentación en forma muy sencilla para la mejor comprensión del tema tratado en beneficio de los ingenieros residentes jóvenes. Se hacen recomendaciones relacionadas con el empleo de lotes de prueba para determinar la efectividad de los patrones de compactación.

Se hace hincapié en la necesidad de entrenar a los operadores de los rodillos vibratorios y de las planchas vibratoras en el uso correcto de los mismos, con el fin de disminuir la frecuencia con la que estos equipos deben entrar al taller de reparaciones mecánicas por motivo de mala operación de los mismos.

Se incluyen aspectos teóricos sobre el efecto que tiene el tipo de suelo en la atenuación de las vibraciones a dos distancias del sitio donde se producen los impactos; una cercana y una lejana. Se trata sobre el efecto del distanciamiento de impactos de vibratoras en el acabado de las carpetas de concreto asfáltico en caliente, con el objeto de mejorar el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y evitar las penalizaciones pecuniarias por acabado fuera de especificaciones.

## INTRODUCCIÓN

La compactación de los suelos granulares y de los productos obtenidos mediante mezcla de suelos granulares con agentes cementantes, es una actividad que cobra mucha importancia en las obras de ingeniería civil, por cuanto se trata de materiales que, por lo general tienen muy alto costo y que además, conforman los elementos más exigidos por las cargas usuarias.

Las bases granulares no cementadas, constituidas por gravas bien gradadas o por piedra de cantera procesada en trituradoras, constituyen una parte muy importante de la estructura de los pavimentos carreteros y representan el puente de transferencia de las solicitaciones impuestas por los vehículos usuarios entre la fundación o subrasante y la superficie de rodamiento, por lo cual es obligatorio obtener en obra densidades que sólo se logran con el empleo de rodillos vibratorios.

En el caso de las mezclas de grava cemento, suelo cemento o de concreto asfáltico en caliente, no es posible concebir la compactación de estos materiales sin el adecuado empleo de los equipos vibratorios, pues los equipos estáticos convencionales no son capaces de manejar con éxito los espesores de capa que requieren las cada vez más exigentes y pesadas cargas vehiculares.

El uso de los compactadores vibratorios se ha incrementado notablemente en los últimos diez años en las obras de ingeniería civil y se puede decir, sin temor a equivocaciones, que la gran mayoría de las empresas constructoras poseen una o varias maquinarias de este tipo, representando un importante porcentaje de su activo, por cuanto cada una de ellas llegan a tener un costo que supera los cien mil dólares.

Lamentablemente, una maquinaria tan útil y costosa no siempre es operada por personal bien entrenado para ello, y no es raro observar que a las pocas semanas de haber sido adquirida pase a formar parte de la fila de equipos que esperan para ser reparadas en un taller, por cuanto ha dejado de trabajar para lo que ha sido diseñada; es decir, para generar vibración cónsona con la obra en la que se utiliza.

Por otra parte, cuando este tipo de maquinaria es mal utilizada, no se logra obtener el producto final deseado y muy pronto se produce la falla funcional de la obra, lo cual implica tener que remover y botar materiales de alto costo, cuyo reemplazo implica a su vez y en muchas oportunidades, la necesidad de acarrearlos desde grandes distancias.

El acabado de buena parte de las superficies de los pavimentos viales y por consiguiente el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) de las mismas, depende del buen uso de los compactadores vibratorios, lo cual exige que los operadores sean capaces de lograr la frecuencia y amplitud de vibración que mejor se adapte al espesor de la capa compactada y al tipo de material a compactar.

## **ASPECTOS GENERALES A SER CONSIDERADOS CUANDO SE COMPACTAN SUELOS GRANULARES CON EQUIPO VIBRATORIO**

Antes de comenzar a desarrollar el tema, queremos hacer hincapié en el encabezamiento de este apartado, por cuanto la vibración tiene un efecto positivo en los materiales granulares, pero no tanto así en los materiales finos arcillosos. Esto lo decimos porque en más de una ocasión hemos presenciado el uso y abuso de los rodillos vibratorios en la compactación de arcillas de mediana y de alta plasticidad, notándose laminación perjudicial en las capas compactadas.

Debemos recordar que los suelos finos plásticos requieren de un efecto de amasado y de lenta liberación de sus presiones de poro para que se logre la densificación de los mismos, pues por su reducida permeabilidad al agua y al vapor de agua en sus poros, no logran expulsar estos fluidos a la velocidad con la cual lo logran los suelos granulares permeables. Por tal motivo, el suelo fino plástico requiere del empleo de rodillos con tacos y/o patas de cabra para lograr el efecto de amasado antes mencionado y ello no es posible lograrlo con el empleo de rodillos vibratorios lisos.

Cuando el suelo fino contiene arena fina y limo en mayor proporción que la arcilla de alta plasticidad, se puede intentar la utilización de rodillos vibratorios con tacos, teniendo especial cuidado de preparar lotes de prueba para analizar en sitio la efectividad de los mismos.

Es por los motivos expuestos en los dos párrafos precedentes que hemos decidido aclarar esta circunstancia antes de adentrarnos en la explicación de los efectos de la vibración en el acomodo y densificación de los esqueletos netamente granulares.

En las consideraciones teóricas que se presentan más adelante en este trabajo, se proporciona una explicación sencilla sobre las causas de la poca efectividad de los rodillos vibratorios en la densificación de los suelos finos plásticos.

### **EXPERIENCIA EN OBRA**

Tras tantos años de trajín en el campo de la compactación con empleo de compactadores vibratorios, incluyendo los equipos livianos y los rodillos pesados auto propulsados, hemos podido comprobar que una gran mayoría de los mismos no logra producir la compactación deseada en el suelo granular, por estar dañado el mecanismo de masas excéntricas que tiene como fin producir la vibración que se requiere para compactar el material en obra.

De encuestas realizadas en más de cuarenta obras, son pocos los ingenieros que han manejado equipos destinados a medir en sitio la frecuencia de vibración de una compactadora y más aún, son muy contados quienes conocen los procedimientos requeridos para determinar la velocidad a la cual deben desplazarse estos equipos para lograr una separación de impactos que no genere ondulaciones en el acabado de la superficie del material compactado y que al mismo tiempo permitan lograr una producción económicamente aceptable.

Cuando se pregunta si los equipos están dotados de algún mecanismo de control para saber cual es la frecuencia de vibración que se aplica en tiempo real, se obtiene como respuesta *“El equipo trae de fabrica tres controles que regulan la vibración: uno para alta frecuencia, otro para frecuencia media y un último para seleccionar la frecuencia baja”*, y continúan respondiendo que... *“y debe funcionar bien pues los controles vienen calibrados de fabrica”*. Este tipo de respuesta no es la que debe dar un Ingeniero Residente, pues su deber es verificar que el equipo se encuentre en perfecto estado de funcionamiento “en obra”.

Se ha podido comprobar sin lugar a dudas, que más del setenta por ciento (70%) de los equipos empleados por los constructores de autopistas y carreteras en Venezuela, no están dotados de frecuencímetros que estén en buen funcionamiento y, aquellos que si los tienen en funcionamiento, no son revisados por los ingenieros residentes para comprobar que el equipo opera bajo condiciones que sean compatibles con el material que se pretende compactar. Ello ocurre simplemente porque no se le otorga a este tema la importancia que debe tener en los procesos de aseguramiento y control de la calidad.

En ninguna de las especificaciones venezolanas de construcción, relacionadas con la compactación de materiales granulares, o de mezclas cementadas preparadas con estos materiales; aparece destacada la necesidad de controlar “en el sitio” la frecuencia de vibración de las compactadoras. Este tema se deja generalmente a juicio del inspector de la obra, quien en la mayoría de las ocasiones no tiene la experiencia necesaria para emitir una opinión técnica adecuada y se basa en las recomendaciones de los vendedores de maquinaria.

Es posible que un equipo nuevo de compactación venga muy bien revisado de la fábrica y que sin embargo, por mala operación del mismo en obra, resulte dañado a los pocos días de haber sido comprado. Esto ocurre con alguna frecuencia y no se puede responsabilizar por ello al fabricante ni al vendedor, pues es culpa del operador. Por ello, resulta indispensable que la verificación de la frecuencia en obra se convierta en un procedimiento de rutina.

### **INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA LA MEDICION EN OBRA DE LA FRECUENCIA DE VIBRACION DE EQUIPOS DE COMPACTACION**

La medición de la frecuencia de vibración se realiza con instrumentos diseñados para visualizar directamente la resonancia de un alambre de longitud controlada o de un peine constituido por láminas previamente calibradas.

Por lo general, se trata de instrumentos pequeños y económicos que se pueden llevar en el bolsillo a cualquier obra y cuyo peso es de pocos gramos. Estos instrumentos reciben el nombre de TACOMETROS y están constituidos por un alambre muy flexible cuya longitud se puede controlar con la mano hasta lograr que resuene por efecto de la vibración del compactador. El tacómetro es también muy utilizado para medir la frecuencia de vibración de los equipos densificadores de mezclas de concreto fresco, conocidos popularmente con el nombre de vibradores.

Cuando el alambre del tacómetro alcanza una longitud que depende de la frecuencia del compactador inspeccionado, comienza a vibrar libremente formando una especie de abanico fácilmente visible, lo cual representa la señal para saber que ha ocurrido el fenómeno de

resonancia y que la cifra que reporta el instrumento corresponde a la frecuencia que se desea medir expresada en vibraciones por minuto (VPM).

Existen varios tipos comerciales de tacómetro, pero los más utilizados son los de “lapicero” y los de “placa circular”. En las fotografías N° 1 y N° 2 se muestran ambos tipos de instrumento:



*Fotografía N° 1: Tacómetro de lapicero*



*Fotografía N° 2: Tacómetro de placa circular*

La medición de la frecuencia se realiza apoyando el instrumento con firmeza en la rueda de la compactadora y se va ajustando la salida de alambre hasta lograr distinguir bien el abanico que se forma en su extremo superior cuando se logra la resonancia. El principio de funcionamiento es similar al de diapasón.

Todos estamos familiarizados con la anécdota según la cual el tenor Enrico Caruso lograba quebrar una copa de cristal cuando su voz alcanzaba tonos muy agudos. Ello se debía al efecto de la resonancia, pues el agudo timbre de su voz hacía que la copa de vidrio vibrara libremente con la misma frecuencia y ocurriera el fenómeno conocido como “fatiga”. Si se conoce la frecuencia resonante del vidrio con el que estaba fabricada la copa, se puede medir la frecuencia de la nota aguda emitida por el célebre tenor.

El Tacómetro de bolsillo, tipo lapicero, se presenta bajo la marca FOWLER VIBRA-TAK y es fabricado en Estados Unidos. Opera con frecuencias de vibración comprendidas entre 2.000 y 21.000 VPM e indica la medida en una escala ubicada a lo largo de la directriz del lápiz en cifras divididas entre 1.000. No obstante, con una ligera y sencilla modificación se puede llegar a medir frecuencias entre las 1.000 y 2.100 VPM, con lo cual se logra reducir la escala del instrumento para poder detectar en obra un equipo de compactación defectuoso y dar el aviso correspondiente al contratista para que ordene la reparación del mismo.

El tacómetro de bolsillo tipo lapicero es útil para medir directamente hasta un límite inferior de 2.000 VPM, pues la modificación que es necesario hacer para lograr bajar este límite puede generar críticas hacia el inspector por parte de los contratistas, quienes no son propensos a aceptar modificaciones a instrumentos que vienen calibrados de fábrica.

En todo caso, la modificación consiste en agregar con Soldimix una pequeña masa en el extremo del alambre, tal como una goma de lápiz, a la cual se le va dando forma esférica hasta lograr que la medición resulte el doble de lo que indica la escala de fábrica. La calibración se hace con un vibrador cuya frecuencia conocida y garantizada sea algo mayor de 3.000 VPM.

En la fotografía N° 3 se muestra el proceso de calibración de un tacómetro modificado, con el uso de un vibrador de los que comúnmente utilizan los quiroprácticos para aliviar la tensión muscular.

La frecuencia propia del aparato empleado para la calibración del instrumento se determina con un tacómetro SIN aditamento alguno, tomando tres medidas con el mismo. De inmediato se agrega la pequeña esfera de goma de borrar en el extremo del alambre y se va moldeando dicha goma con una hojilla, hasta lograr que la nueva medición con EL MISMO EQUIPO DE CALIBRACION registre el doble de la frecuencia obtenida con el tacómetro SIN ADITAMENTO.



*Fotografía N° 3: Fenómeno de resonancia*

El Tacómetro de placa circular, mostrado en la fotografía N° 2, es fabricado en Alemania con la marca TREYSIT, por Werner Ermel, D3578 Treysa, W Germany y se conoce en idioma alemán como “*Drehzahlmesser*”. Este instrumento mide DIRECTAMENTE frecuencias en un rango comprendido entre las 800 y las 50.000 VPM; razón por la cual es muy utilizado en la inspección del funcionamiento de compactadoras vibratorias en toda Europa.

En la ventana superior del instrumento, la cual se ubica en el frente del mismo, se indican las vibraciones por minuto (VPM) divididas entre 1.000. Ello quiere decir que el número que se obtiene en la ventana al entrar el alambre en resonancia cuando se inspecciona un rodillo vibratorio, debe ser multiplicado por 1.000 para obtener las VPM propias del compactador.

En la ventana inferior del instrumento se indican los CICLOS POR SEGUNDO o lo que es equivalente a HERZIOS, pudiendo notarse que si se miden 6.000 VPM en la ventana superior, ello equivale a 100 HZ en la ventana inferior; es decir a  $60 \text{ segundos} \times 100 \text{ HZ} = 6.000 \text{ VPM}$ .

El alambre flexible se encuentra enrollado dentro del instrumento y va saliendo por un orificio ubicado a las 9 horas en el círculo inferior. Para lograr aumentar su longitud, se gira la circunferencia superior del instrumento en el sentido antihorario y para acortar dicha longitud, se gira en sentido horario.

La circunferencia de la parte posterior del instrumento se apoya firmemente en la superficie en la que se desea medir la frecuencia de vibración. Una vez apoyado el instrumento se comienza a girar la rueda superior hasta que el alambre salga lo suficiente como para que se produzca el fenómeno de la resonancia y el pequeño círculo amarillo ubicado en el extremo superior del alambre forme un abanico amplio.

Conviene dejar constancia de que el instrumento también mide armónicas y que en consecuencia el alambre forma pequeños abanicos o bucles a frecuencias mayores que la de resonancia. Por tal motivo, se requiere no confundir la frecuencia de la armónica con la frecuencia de la resonancia. Para tal fin, se recomienda continuar aumentando la longitud del alambre hasta obtener la frecuencia resonante.

La medición se repite tres (3) veces para obtener una respuesta precisa, promediando los tres resultados obtenidos al leer en la ventana superior. El inspector se sorprende muchas veces al notar la repetibilidad de las medidas, lo cual indica que el instrumento es muy preciso, a pesar de ser tan sencillo.

### **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA FRECUENCIA ÓPTIMA DE LOS RODILLOS VIBRATORIOS UTILIZANDO EL TACOMETRO**

Una de las preguntas más frecuentes hecha por los ingenieros inspectores a los ingenieros consultores, es la relacionada con la escogencia de la frecuencia de los rodillos vibratorios para lograr una buena compactación en un determinado material granular, ya sea que este sea cementado o no cementado.

Muchas veces nos encontramos ante la necesidad de establecer el mejor patrón de compactación para lograr económicamente la densificación especificada para una base de suelo estabilizado con cemento y disponemos de rodillos vibratorios de una determinada marca de fábrica cuyo peso estático conocemos. Nos corresponde determinar ¿cuál es la mejor frecuencia de vibración del rodillo? y ¿cuál la velocidad de operación del mismo?.

El patrón más conveniente de compactación será aquel que permita lograr la densificación exigida por las especificaciones contractuales con el menor número posible de pasos del rodillo y a una velocidad que no cause ondulaciones en la superficie en forma de “sartenejas”.

La experiencia nos ha permitido observar que las ondulaciones superficiales en los materiales cementados se produce cuando la distancia entre impactos del rodillo es superior al treinta por ciento (30%) del espesor de la capa compactada. Ello quiere decir, en lenguaje sencillo, que si vamos a compactar una capa de veinte (20) centímetros de espesor final de suelo granular estabilizado con cemento Pórtland, los impactos producidos por el rodillo no deben estar separados más de  $0,30 \times 20 = 6$  centímetros.

En las fotografías N° 4 y 5, se muestran rodillos vibratorios lisos especialmente diseñados para la compactación de carpetas asfálticas. Para la compactación de concreto asfáltico, existen varias marcas reconocidas en el mercado, tales como: Vibromax, Vibradyne, Caterpillar, Bitelli, Bomag y Bobcat. Las marcas mencionadas son las más utilizadas en Venezuela.



*Fotografía N° 4: Compactadora vibratoria de doble rodillo liso*



*Fotografía N° 5: Compactadora vibratoria de un rodillo liso y neumáticos de tracción*

Si disponemos de un rodillo que produce 1.800 VPM, dicho rodillo generará 1.800 impactos por minuto sobre la mezcla de suelo estabilizado con cemento y que, dependiendo de la velocidad con la que se mueva el rodillo, se podrá garantizar que la distancia entre impactos sea igual o ligeramente menor que seis (6) centímetros para un espesor de veinte (20) centímetros.

Si el rodillo se mueve a cuatro kilómetros por hora (4 Km./H), recorrerá 66,67 metros por minuto, lo cual se obtiene al dividir 4.000 metros entre 60 minutos. Ahora bien, si el rodillo genera 1.800 impactos por minuto, esos 1.800 impactos se reparten en 66,67 metros y cada impacto estará separado del otro  $66,7/1.800 = 0,037$  m; es decir, 3,7 cm., distancia entre

impactos, lo cual resulta bastante menor que los 0,06 m. deseados. Ello significa que podemos aumentar la velocidad de compactación a 5,5 Km./h., pues  $5.500/60$  es igual a 91,67 m/min. y que la distancia entre impactos es de  $91,67/1.800 = 0,051$  m, vecino a los 0,06 m. deseados.

En el caso que estamos analizando podríamos decidir aceptar que el rodillo compactador vibre a razón de 1.600 VPM y mantener los 5,50 Km./h., por cuanto la separación entre impactos resultaría de 0,057 m y estaríamos por debajo de la separación recomendada de 0,06 m.

La combinación de frecuencia y distancia entre impactos antes calculada nos indica que es la mejor combinación, pero que es también necesario saber si la densificación se logra en todo el espesor de la capa, para lo cual debemos conocer el peso estático del compactador, para estimar hasta que profundidad llega su efecto.

La mejor manera de lograr este cometido es haciendo uso de un lote de prueba de cien (100) metros de largo y medir las densidades obtenidas para cada número de pasadas acumuladas entre tres (3) y cinco (5), manteniendo la frecuencia en 1.800 VPM y la velocidad de 5,50 Km./hora, para lo cual es necesario que los 100 metros sean recorridos por el rodillo en un minuto y 6 segundos, y que el tacómetro indique que la frecuencia de vibración del rodillo es  $1.800 \text{ VPM} \pm 20 \text{ VPM}$ .

Recientemente se logró reducir el número de pasadas del patrón de compactación en el caso de una capa de escoria de acería de ochenta centímetros (80 cm.) de espesor, que se compacta sobre suelo blando en el sitio del patio del astillero de Puerto Ordaz, en la vecindad de SIDOR. Para ello se utilizó el tacómetro TREYSIT y se realizaron dos pruebas de plato para determinar el valor del módulo de balasto resultante para cada pasada adicional a las dos pasadas. El trabajo de campo y de oficina se ejecutó en dos días, lográndose un cuantioso ahorro para el propietario de la obra.

En la fotografía N° 6, que se presenta a continuación, se observa la compactación de un lote de prueba sobre escoria de acería en el área del Astillero del río Orinoco en Puerto Ordaz.



*Fotografía N° 6*

En todo caso, los tacómetros pueden ser empleados para calibrar los equipos de compactación en “lotes de prueba”, en cualquier tipo de material granular, lo cual permite obtener el patrón de compactación que sirva para lograr la densificación especificada a un costo razonable. Todo ingeniero inspector debe estar en cuenta de la factibilidad de poder determinar en obra la frecuencia de vibración que más se adapta a cada material estudiado y para ello debe utilizar los “lotes de prueba” y los instrumentos adecuados de medición.

### **ESCOGENCIA DE LA FRECUENCIA DE VIBRACION SEGÚN EL TIPO DE MATERIAL GRANULAR A SER COMPACTADO**

No resulta lo mismo compactar una capa de arena fina que una de grava arenosa, ni tampoco resulta lo mismo compactar una mezcla de concreto asfáltico en caliente que una mezcla de grava cemento. Para cada tipo de material granular se requiere un equipo adecuado que trabaje a una frecuencia adecuada y que produzca una amplitud de vibración también adecuada al caso.

Las gravas limpias y las gravas poco arenosas deben ser compactadas con altas frecuencias en el rango de las 2.300 a 2.500 VPM, pudiendo ser operados los rodillos a velocidades tan altas como 7 Km./h. en capas de hasta 50 centímetros. Esta recomendación es muy importante para el caso de los espaldones aguas abajo de las represas de tierra diseñadas con núcleo de arcilla.

Cuando se está compactando un material muy gravoso es de suma importancia verificar que no se exceda la frecuencia de 2.500 VPM, especialmente en el caso de los rodillos pesados de 12 toneladas, por cuanto ello implicaría la modificación de la granulometría del suelo por fractura de los granos gruesos, disminuyendo la permeabilidad del suelo compactado.

Cuando el contenido de finos (menores del cedazo # 200) de un material granular supera el quince por ciento (15%), comienzan las dificultades para estimar la frecuencia más conveniente para su densificación, pues el material requiere de mayor humedad para lubricar sus granos y se generan presiones intersticiales altas durante la compactación.

La compactación de suelos finos con rodillos vibratorios no es recomendada, pues los impactos generan aumentos bruscos de la presión de poros que, por causa de la impermeabilidad del suelo, no se disipa con facilidad y crea movimientos ondulatorios del terreno en forma de “bombas”.

Si bien los limos no son suelos granulares, y no deberían ser considerados en el presente trabajo, existe una tendencia a compactarlos con equipo vibratorio. La bondad del método de compactación vibratorio en los limos, debe ser siempre comprobada en lotes de prueba.

La compactación de los limos muy arenosos resulta siempre bastante complicada, y es difícil recomendar un patrón de compactación fundamentado en una frecuencia superior a los 1.500 VPM. En estos casos se debe recurrir a los “lotes de prueba”, observando el comportamiento del suelo al paso del rodillo. Por lo general se forma “onda adelante del rodillo” cuando se emplea un rodillo pesado de más de 4.500 Kg., si la humedad óptima está sobrepasada en más de 2 % y la frecuencia de vibración es superior a las 1.500 VPM. En estos casos juega un papel muy importante la permeabilidad del suelo, la cual está en el orden de  $1 \times 10^{-4}$  cm. /seg.

Los ingenieros que tienen a su cargo la supervisión de la compactación de arenas limpias bien gradadas, clasificadas como SW en la Clasificación Unificada de Casagrande, deben tomar precauciones para garantizar el confinamiento lateral de la capa a compactar, pues es muy frecuente que los rodillos vibratorios produzcan desplazamiento lateral del suelo y que la compactación en los bordes resulte muy deficiente. La mejor manera de confinar lateralmente el suelo arenoso es mediante el uso de cajuela excavada en la fundación del relleno. No se recomienda la construcción de terraplenes de arena bien gradada sin estabilizar definitivamente la zona de los taludes.

En el caso de las arenas mal gradadas, como las que provienen de “dunas” se debe aumentar el cuidado del confinamiento lateral, pues la compactación sin el debido confinamiento genera muy mala densificación en los bordes, donde el suelo tiende a desplazarse en forma notable hacia los taludes. El uso de rodillos vibratorios debe limitarse al centro del relleno, alejándose unos dos metros (2 m.) de los bordes, los cuales deben ser rellenados con material de mejor gradación que contenga finos suficientes como para proveer confinamiento lateral. Se recomienda que el material de relleno de los bordes contenga al menos un 8 a 10 % de finos pasantes por el cedazo # 200. Esta previsión se puede lograr cuando se extienden las capas sueltas, y se colocan las conformadas por suelos más finos en los bordes del relleno antes de iniciarse el proceso de compactación.

La compactación de los Loess, los cuales son suelos finos no plásticos que se parecen mucho a los limos, y que tienen origen eólico; requiere de suma prudencia, pues si bien estos suelos pueden ser compactados con la ayuda de rodillos vibratorios a baja frecuencia y con poco peso, obteniéndose una buena densificación sin la necesidad de confinamiento lateral, resultan MUY SUCEPTIBLES a la acción erosiva del agua de lluvia, produciéndose grandes cárcavas en los taludes. En estos casos conviene pensar seriamente en la estabilización del suelo con un mínimo de cemento para resolver la situación.

El proceso de compactación de carpetas de grava o suelo granular estabilizado con cemento Pórtland es una actividad muy delicada, pues la maquinaria de compactación debe entrar al lote cuando el cemento tiene menos de dos horas de haber sido añadido al suelo, siendo conveniente que no se dejen pasar más de noventa (90) minutos entre el momento de salida del mezclador y el momento de entrada del rodillo vibratorio. Cuando se irrespeta esta recomendación se corre el riesgo de producir micro fisuras en la carpeta y aumentar el peligro de falla prematura.

La colocación en las bases de autopistas de tráfico pesado de las carpetas de grava estabilizada con cemento, no debe realizarse con equipo acabador de concreto asfáltico (Finisher), pues se corre el riesgo de obtener una superficie extremadamente lisa sobre la cual deslizan las carpetas de concreto asfáltico en caliente. El acabado de la superficie de una base de grava o suelo estabilizada con cemento Pórtland debe resultar rugoso, para lo cual es necesario pasar un rodillo con tacos al finalizar la compactación con rodillos vibratorios. El uso de equipos compactadores sobre neumáticos para terminar la compactación y densificar la zona superficial, debe ser supervisado con mucha atención, para evitar la generación de una superficie muy lisa que pueda traer como consecuencia el deslizamiento de carpetas descrito más arriba. Jamás se debe permitir la colocación de carpetas de concreto asfáltico sobre bases estabilizadas con cemento Pórtland si no ha sido comprobada la rugosidad y limpieza.

En las fotografías N° 7, 8 y 9, se muestran corrimientos de la carpeta de rodamiento y de la base asfáltica en el tramo El Chino – El Guayabo de la autopista San Felipe – Morón, en el Estado Yaracuy. La foto N° 9 muestra en detalle la superficie lisa y húmeda de la base de grava-cemento sobre la cual se apoyaron las carpetas asfálticas. Es de hacer notar que los corrimientos mostrados en las fotos ocurrieron a los cuatro (4) meses de haber sido inaugurada la obra.



*Fotografía N° 7*  
*Corrimiento de la carpeta de concreto asfáltico por lisura extrema de la superficie de la base.*



*Fotografía N° 8*  
*Detalle del corrimiento de la carpeta por mala inspección de la superficie del apoyo de la carpeta*



*Fotografía N° 9*

*Nótese la textura de la superficie de la base de y su contaminación con barro, generando un plano liso de falla por el que corre la carpeta.*

Cuando se requiere compactar una primera capa de material granular grueso (Grava Arenosa) sobre una fundación de suelo fino blando o ligeramente rígido (CL, CH, OL o ML); es indispensable realizar un par de pasadas con el rodillo estático de 4 a 6 Ton y luego dar dos o tres pasadas utilizando el mismo rodillo con baja frecuencia de vibración (1.600 a 1.800 VPM). Modernamente se resuelven muchos problemas de buen asiento de la capa granular con el empleo de geomallas biaxiales protegidas en su parte inferior con geotextil no tejido; para evitar la contaminación del material granular con los finos de la fundación y contribuir a aliviar las presiones de poro que se generan.

## EL FENOMENO DE ATENUACION DE LAS ONDAS

Existen trabajos de investigación en los que se ha determinado la atenuación de las ondas Raleigh (Ondas Superficiales) que se producen cuando se utilizan rodillos vibratorios lisos y rodillos con patas en un determinado sitio. La atenuación se mide a 50 y a 100 pies de distancia de la fuente y se corrige por ruidos parásitos provenientes de la cercanía. En la investigación realizada por Hal Amick en el año 1.999, (Referencia 2) se pudo determinar que las vibraciones de alta frecuencia causadas por los rodillos vibratorios se atenúan más a los 100 pies que las de baja frecuencia. Es por tal motivo que la compactación de suelos granulares con rodillos vibratorios lisos apenas se siente a los veinticinco metros de distancia del sitio donde se está compactando.

Lo expresado en el párrafo anterior significa que las vibraciones de baja frecuencia que producen los rodillos vibratorios con “tacos” (Parecidos a las Patas de Cabra), cuando son utilizados en limos muy húmedos, se atenúan muy poco a los 25 metros de distancia, y por ello se siente el temblor de la superficie cuando se camina a esta distancia del compactador.

Nos hemos permitido tomar varios valores de atenuación como se muestra en las tablas N° 1 y N° 2 que se presentan a continuación, tomadas de Hal Amick en su investigación realizada en 1.999 (Referencia 2), con el simple propósito de demostrar la influencia del tipo de suelo en la propagación de las ondas tipo Raleigh. A continuación, se presentan los referidos valores de atenuación varios investigadores (Barkan, Richards, Woods, Forssblad, Dalmatov, Clough & Chameau y Peng).

<b>INVESTIGADOR</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>COEFICIENTE DEL MATERIAL <math>\alpha</math> (pies<sup>-1</sup>)</b>
Forssblad	Arena limosa con grava	0.040
Richart	Losa de concreto sobre relleno granular (espesor de 10 a 15 cm.)	0.006
Woods	Arena fina limosa	0.080
Barkan	Arena fina saturada	0.030
	Arena fina saturada congelada	0.018
	Arena saturada con suelo orgánico laminar	0.012
	Arcilla con arena y limo sobre el N.F	0.012

Barkan	Marly Chalk	0.03
	Loess y Suelo Loésico	0.03
	Arcilla saturada con arena y limo	0.012 – 0.036
Dalmatov, et al.	Arena y limos	0.008 – 0.110
Clough and Chameau	Relleno de arena sobre fango de bahía	0.015 – 0.060
	Arena de Dunas	0.008 – 0.020
Peng	Arcilla blanda de Bangkok	0.079 – 0.134

*Tabla N° 1: Sumario de las publicaciones sobre coeficientes de atenuación  $\alpha$ , tomada de la referencia 2.*

Como se puede observar en la tabla N° 1 antes citada, el coeficiente de atenuación del material, identificado con la letra griega  $\alpha$ , es tres y media veces mayor en una grava arenosa que en las arenas finas y los limos ubicados por encima del nivel del agua subterránea.

La tabla N° 2 muestra los valores del coeficiente de atenuación  $\alpha$  y del valor del coeficiente  $\rho$  para diferentes suelos, utilizando la descripción visual de los mismos. Estos valores son de mucha utilidad para entender como se propagan las ondas superficiales.

CLASE	DESCRIPCION DEL MATERIAL	COEFICIENTE DE ATENUACION $\alpha$ (PIES <sup>-1</sup> ) a 5 Hz	$\rho$
I	Suelos débiles a blandos, fácilmente penetrables, suelos loésicos, turba seca o parcialmente saturada, barro, arena suelta de playa y arena de duna, terreno recién arado y suelos orgánicos.	0.003 – 0.01	$2 \times 10^{-4}$ a $6 \times 10^{-4}$
II	Suelos competentes que pueden ser excavados con palas, mayormente arenas, arcillas arenosas, arcillas limosas, limos gravosos y roca meteorizada.	0.001 – 0.003	$6 \times 10^{-5}$ a $2 \times 10^{-4}$
III	Suelos duros que no pueden ser excavados con pala y que deben ser picados para romperlos: arena compactada densa, arcilla consolidada seca y alguna roca expuesta	0.0001 – 0.001	$6 \times 10^{-6}$ a $6 \times 10^{-5}$
IV	Rocas duras y competentes que difícilmente se rompen con el martillo: roca base y roca dura fresca	< 0.0001	< $6 \times 10^{-6}$

*Tabla N° 2: Tipos de suelos y coeficientes de atenuación  $\alpha$  y  $\rho$*

Como se podrá entender al analizar los referidos valores de atenuación, la onda superficial y la de cuerpo se atenúan más en los suelos de grano grueso y por ello es necesario emplear mayor peso y mayor frecuencia para lograr aumentar su densificación.

### **ASPECTOS TEORICOS PARA EXPLICAR LA DEPENDENCIA DEL FACTOR DE ATENUACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUELO Y DEL RODILLO VIBRADOR**

Con la finalidad de explicar la procedencia de las tablas N° 1 y 2 del trabajo de Hal Amick, hemos considerado conveniente hacer una corta exposición teórica sobre los factores que intervienen en la propagación de ondas superficiales en el suelo.

Si denominamos  $c$  a la velocidad de la onda en el suelo y  $\lambda$  a la longitud de onda, conociendo la frecuencia circular  $\omega$  aplicada por el equipo de compactación podremos determinar la relación de decaimiento entre ondas sucesivas  $\delta$  y el valor de  $\rho$  empleando la expresión matemática:

$$\delta = c \times \frac{\alpha}{\omega} \quad (1)$$

En la que  $\delta$  representa el decaimiento entre ondas sucesivas y  $\rho$  representa la relación entre  $\eta$  y  $c$ , dada por  $\rho = \eta/c$ , ambas constantes dependen del tipo de suelo, pues  $\rho$  es mayor para los suelos finos blandos y menor para suelos gruesos compactos y para las rocas, puesto que la velocidad  $c$  de propagación de la onda superficial es mayor en la roca que en el suelo fino blando. (El valor de  $\eta = \delta / \pi$ )

Por otra parte sabemos que  $\omega = 2 \times \pi \times f$  en la que  $f$  es la frecuencia de vibración en ciclos por segundo. De aquí se deduce que:

$$\delta = 2 \times \pi \times \alpha \times c / \omega \quad (2)$$

y despejando  $\alpha$  de esta ecuación se obtiene la siguiente expresión matemática para el coeficiente de atenuación:

$$\alpha = \eta \times \pi \times f / c = \rho \times \pi \times f \quad (3)$$

en la que  $\rho$  depende del tipo de suelo y  $f$  de la frecuencia del rodillo vibratorio empleado.

La expresión matemática (3) indica que el coeficiente de atenuación  $\alpha$  es proporcional a la frecuencia del rodillo vibrador y que para un mismo valor de  $\rho$  se requiere de más frecuencia para que la atenuación de la onda sea mayor y no se disipe el esfuerzo de compactación en la capa de suelo granular que se trata de densificar.

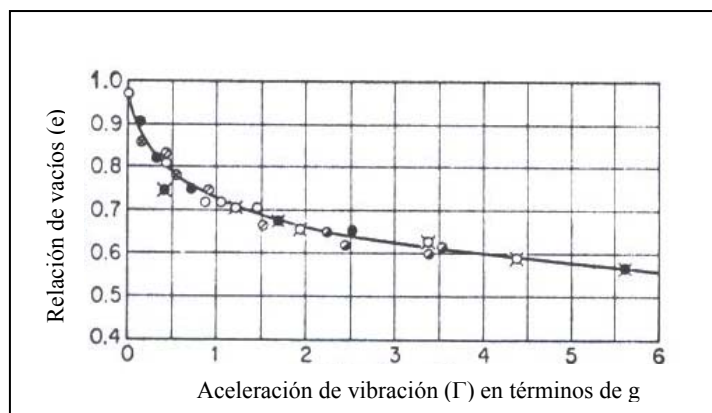
## DENSIFICACION DE SUELOS POR MEDIO DE LA VIBRACION

La relación entre la aceleración de las vibraciones y la aceleración de la gravedad  $g$  se distingue con la notación  $\Gamma$  y viene dada por un número positivo comprendido entre 0 y 7. Ello quiere decir que la aceleración que imponen las vibraciones a una partícula de suelo siempre es mayor que la aceleración de la gravedad y vale 1 en el caso del rodillo estático.

De acuerdo con Barkan (Referencia 1) “*Los experimentos señalan que el parámetro más importante que determina el efecto de las vibraciones y de los impactos en la compactación de los suelos es la aceleración, o mejor dicho la fuerza inercial que actúa sobre las partículas de suelo durante el proceso de vibración*”.

Lo expresado en el párrafo anterior significa que el sistema conformado por el suelo granular y por el equipo que produce las vibraciones trabaja de forma tal, que cuando la densidad de las partículas del suelo es alta la fuerza inercial es también alta, aunque no sigue una proporción lineal. La función que aproxima la relación de vacíos  $e$  con  $\Gamma$  tiende a ser asintótica con el eje de las  $X$  a medida que  $\Gamma$  crece. Por ello la tangente a la curva va decreciendo a medida que  $\Gamma$  crece, alcanzando un valor constante para valores altos de  $\Gamma$ . Ello significa que el suelo granular no se puede densificar infinitamente con la vibración y que alcanza una densidad máxima por encima de la cual no puede densificarse más.

La gráfica N° 1 que presenta Barkan en la referencia 1, nos muestra la forma de la curva “ $e$  vs.  $\Gamma$ ”, indicando que un suelo suelto cuya relación de vacíos  $e$  es vecina a 0,95 en estado estático, alcanza un valor de  $e$  vecino a 0,58 al ser compactado con rodillo vibrador. Es decir que  $e$  resulta 61 % más bajo cuando el suelo es compactado por la vibración.



Gráfica N° 1: Relación de vacíos ( $e$ ) vs. Aceleración de vibración ( $\Gamma$ ).

Si consideramos que en este caso 0,95 representa la relación de vacíos máxima y 0,58 la relación mínima, un valor de  $e$  de 0,67 representará una densidad relativa ( $D_r$ ) de 75,67 % y que el suelo granular está bien compactado. Cuando  $e$  baja hasta 0,60, la densidad relativa ( $D_r$ ) sube hasta 94.59 %, lo cual es indicativo de una compactación muy alta.

La expresión matemática que relaciona a la densidad del suelo con la vibración impuesta por el compactador viene dada por:

$$e = e_{\min} + (e_{\max} - e_{\min}) \times \exp(-\beta \cdot \Gamma) \quad (4)$$

en la que  $\beta$  es el coeficiente de compactación del suelo y  $\Gamma$  la relación entre la aceleración de la vibración y la aceleración de la gravedad. El valor  $\beta$  se expresa en términos de  $g$  y significa cuantas gravedades se imponen al suelo con el rodillo. Por ejemplo  $2g$  significa dos veces el valor de  $g$ , es decir,  $2 \times 9,81 = 19,62 \text{ m/seg}^2$ .

El valor del coeficiente de compactación  $\beta$  se determina en sitio mediante “lotes de prueba” y es característico para cada tipo de suelo granular en particular.

En consecuencia, cuando un suelo granular parte de una relación de vacíos  $e$  diferente a la mínima  $e_{\min}$ , la expresión que relaciona  $e$  con las vibraciones viene dada por la siguiente ecuación:

$$e = e_{\min} + (e^0 - e_{\min}) \times \exp(-\beta \cdot \Gamma) \quad (5)$$

Al estudiar esta expresión vemos que  $e^0$  indica la relación de vacíos del suelo cuando  $\Gamma$  es cero, es decir cuando no actúa la compactadora vibratoria sobre su masa, o dicho de otra manera, cuando la “fuerza inercial” es cero.

Por lo expresado en el párrafo anterior, cuando el coeficiente de compactación  $\beta$  del suelo crece y  $\Gamma$  permanece constante, la densificación crece, pues el signo del exponente de la base de logaritmos neperianos es negativo. Igual cosa sucede si  $\beta$  permanece constante y  $\Gamma$  crece. Si ambas crecen el suelo se densifica hasta alcanzar su densidad máxima.

¿Cómo puede explicarse el crecimiento de  $\Gamma$ ? Sólo cuando la aceleración de la vibración crece y ello sólo ocurre cuando la frecuencia de la vibración y el peso del vibrador aumentan. Ello quiere decir que un rodillo vibratorio de 8 toneladas que trabaja a 1.800 VPM genera una fuerza inercial menor que uno de 14 toneladas vibrando a la misma frecuencia.

Sin embargo, las combinaciones matemáticas del peso y de la frecuencia no todas son posibles, pues un rodillo que vibre a 5.000 VPM resultaría costosísimo, debido a que el mecanismo que genera las vibraciones destrozaría al compactador y causaría daño físico al operador. Por ello es conveniente aumentar el peso del compactador de 8 a 14 toneladas y mantener la frecuencia entre 2.000 y 3.000 VPM, salvo en caso excepcional que llega a 4.000.

La fuerza inercial es igual a la masa por la aceleración y la aceleración es función de la frecuencia de vibración. Por ello acelera mucho más un equipo cuyo período de vibración sea bajo, es decir, que vibra con mayor frecuencia. Esto sucede también con las edificaciones durante un sismo, pues el espectro de respuesta de la pseudo aceleración tiene un pico en la frecuencia alta y desciende en la frecuencia baja para el caso de las rocas, los suelos arenosos y los suelos gravosos densos.

Por lo expuesto hasta aquí se comprende porqué la compactación de suelos granulares gruesos exige del uso de rodillos compactadores de 12 a 14 toneladas y frecuencias de 2.000 a 2.500 VPM para lograr alcanzar una alta densidad.

La ecuación diferencial que representa la densificación de un suelo granular viene dada por la expresión:

$$\frac{de}{d\Gamma} = -\beta \cdot (e - e_{\min}) \quad (6)$$

Siendo  $\beta$  el coeficiente de proporcionalidad o también llamado “coeficiente de compactación vibratoria”.

Si  $\Gamma$  es igual a cero, entonces  $e = e^0$  y obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{e^0 - e_{\min}}{\tan u} \quad (7)$$

En la que  $u$  es la pendiente de la curva y  $e^0$  es el valor inicial de la relación de vacíos cuando  $\Gamma = 0$ .

El significado físico del coeficiente  $1/\beta$  puede ser explicado de la siguiente manera: Si existe una relación lineal entre  $e$  y  $\Gamma$ , entonces el valor de  $1/\beta$  es igual al valor de la aceleración de la vibración, que induce la máxima compactación del suelo.

Si integramos la ecuación diferencial (6) obtenemos la siguiente expresión:

$$e = e_{\min} + C \cdot \exp(-\beta \cdot \Gamma) \quad (8)$$

En la que  $C$  es una constante de integración cuyo valor se determina haciendo  $\Gamma=0$ , lo cual nos proporciona  $e = e^0$  y  $C = (e^0 - e_{\min})$ .

Sustituyendo el valor de la constante de integración  $C$  en la ecuación (8) se obtiene:

$$e = e_{\min} + (e^0 - e_{\min}) \cdot \exp(-\beta \cdot \Gamma) \quad (9)$$

Si asumimos que el suelo granular se encuentra en su estado más suelto ( $e = e_{\max}$ ) antes de ser compactado mediante vibraciones; la ecuación de la curva de compactación por efecto de la vibración viene dada por la siguiente expresión:

$$e = e_{\min} + (e_{\max} - e_{\min}) \cdot \exp(-\beta \cdot \Gamma) \quad (10)$$

Si como resultado de la vibración generada con aceleración  $\Gamma = \Gamma_0$ , la relación de vacíos decrecerá a  $e^0$ , como se muestra en la siguiente expresión:

$$e^0 = e_{\min} + (e_{\max} - e_{\min}) \cdot \exp(-\beta \cdot \Gamma_0) \quad (11)$$

Substituyendo el valor de  $e^0$  en la ecuación (9) se obtiene la expresión siguiente:

$$e = e_{\min} + (e_{\max} - e_{\min}) \cdot \exp[-\beta(\Gamma + \Gamma_0)] \quad (12)$$

En la ecuación mostrada arriba,  $\Gamma_0$  es el valor de la aceleración de la vibración que se requiere para llevar al suelo desde su estado más suelto hasta el estado natural de compactación estática que es caracterizada por  $e^0$ , en el que  $e^0 < e_{\max}$ . (Estado intermedio entre  $e_{\max}$  y  $e_{\min}$ ).

La ecuación (10) contiene tres (3) parámetros:  $e_{\max}$ ,  $e_{\min}$  y  $\beta$ . Los parámetros  $e_{\max}$  y  $e_{\min}$  no dependen del contenido de humedad del suelo y sólo son afectados por la distribución granulométrica y por el tamaño máximo de los granos de arena o grava, el valor de  $\beta$ , depende también del contenido de humedad y debe ser determinado en lotes de prueba.

La explicación de la influencia de la humedad en la densificación de los suelos granulares, queda fuera del alcance del presente trabajo; no obstante, si el lector desea adentrarse en este campo, puede recurrir a la referencia 1, en la que dicho tema se encuentra muy bien detallado.

### **FORMA PRÁCTICA DE DETERMINAR LA ACELERACION QUE PRODUCE EL EQUIPO VIBRATORIO**

En los catálogos de los fabricantes de los rodillos vibratorios se indica el valor de lo que ellos denominan como “Fuerza Centrífuga del Rodillo”, lo cual no es otra cosa que la fuerza que produce la masa del rodillo cuando es sometida a la aceleración de la vibración. En base a dicha cifra, se puede tener un valor de la aceleración de la vibración empleando el siguiente razonamiento:

El peso del rodillo en condición estática ( $P_0$ ) viene dado en las especificaciones indicadas en el catálogo. Si se trata de una compactadora de un sólo rodillo dotada con neumáticos de tracción, el peso al que se refieren las especificaciones es el peso que actúa sobre el rodillo metálico liso. Cuando se trata de máquinas que operan con dos rodillos, el catálogo proporciona el peso de cada uno de los rodillos y es preciso tener cuidado el cálculo de la aceleración de la vibración.

Si ahora dividimos el peso reportado en el catálogo entre el valor de la aceleración de la gravedad, obtendremos el valor de la masa. Como conocemos la fuerza que aplica la vibración y que es denominada “Fuerza Centrífuga” en el catálogo, sólo tenemos que aplicar la expresión siguiente para calcular la aceleración de la compactadora expresada en “número de gravedades”:

$$F_c = m_r \cdot a_v = \frac{P_r}{g} \cdot a_v = P_r \cdot \frac{a_v}{g} \quad (13)$$

en la que  $F_c$  es la fuerza centrífuga a que se refiere el catálogo,  $m_r$  es la masa del rodillo,  $a_v$  es la aceleración que produce la vibración y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

La relación  $a_v/g$  no es otra cosa que la aceleración de las vibraciones expresada en términos de la aceleración de la gravedad, por lo que si dividimos el valor de  $F_c$  entre  $a_v/g$  obtendremos el número de gravedades a que corresponde la aceleración que genera la vibración del rodillo.

Por ejemplo, si la fuerza centrífuga reportada en el catálogo es 34.860 libras y el peso estático del rodillo es 14.820 libras, la aceleración producida por las vibraciones será 2,35 veces la aceleración de la gravedad. Este valor corresponde a  $\Gamma$ , como ya se ha explicado anteriormente en el presente trabajo. Si la aceleración de la gravedad es  $9,81 \text{ m/seg}^2$  el rodillo producirá una aceleración por vibraciones equivalente a  $9,81 \times 2,35 = 23,05 \text{ m/seg}^2$ .

Es de hacer notar que la aceleración que produce la mayoría de los rodillos vibratorios que existen en el mercado está comprendida entre 1,60 y 3,40 g, dependiendo del tipo de rodillo y del uso para el cual está recomendado por la casa fabricante.

Si deseamos comprobar en el campo que el rodillo vibrador está generando la aceleración de las vibraciones que especifica la casa fabricante, no tenemos más que referirnos al “lote de prueba” para medir la frecuencia con el tacómetro. El valor de la relación de vacíos que se obtenga en el campo en el lote de prueba nos permitirá calcular la aceleración, pues ya conocemos  $\beta$ , por tratarse de un suelo ensayado con anterioridad y podemos despejar  $\Gamma$  de la fórmula (10). Por ello conviene que el residente lleve un control muy detallado de cada lote de prueba.

Por ejemplo, si la relación de vacíos máxima es 0,86, la mínima es 0,47, la relación de vacíos de campo lograda con la vibración es 0,65 y el valor de  $\alpha$  es 0,64, podemos estimar el valor de la aceleración aplicando la fórmula 10.

$$e = e_{\min} + (e_{\max} - e_{\min}) \exp(-\alpha \cdot \Gamma)$$

$$0,65 = 0,47 + (0,86 - 0,47) \exp(-0,64\Gamma)$$

$$\frac{0,65 - 0,47}{0,86 - 0,47} = \exp(-0,64 \cdot \Gamma)$$

$$\exp(-0,64 \cdot \Gamma) = 0,461538$$

El logaritmo neperiano de 0,461538 es -0,7732 y en consecuencia  $\Gamma$  vale  $0,7732/0,64 = 1,20$ , valor que corresponde a la aceleración en obra de las vibraciones producidas por el rodillo en términos de  $g$ . Ello quiere decir que el rodillo produce una aceleración de  $1,20 \times 9,81 = 11,85 \text{ m/seg}^2$ .

El valor 1,20 g luce bajo, y la densificación que se obtiene es apenas veinte por ciento mayor que la que produce el rodillo SIN VIBRAR. Por ello debemos verificar si la frecuencia de la

vibración en obra es parecida a la obtenida en otro lote similar, para lo cual empleamos el tacómetro.

Si la frecuencia medida en obra resulta más baja que la frecuencia en VPM que se ha obtenido en otro LOTE SIMILAR para lograr el valor de  $e$  de ese lote, ello es una clara indicación de que el rodillo no está trabajando bien y que requiere ser revisado en el taller.

Es conveniente volver a destacar que la frecuencia más apropiada para la compactación de un suelo granular en obra no debe de estar muy alejada de la frecuencia reportada por la fábrica a la salida del equipo nuevo, y que el ingeniero residente de campo debe llevar un buen registro de los resultados de la densificación del tipo de suelo estudiado en todos los lotes de prueba, con el fin de poder detectar a tiempo el mal funcionamiento del rodillo vibratorio en obra.

### CAUSA MAS FRECUENTE DE MAL FUNCIONAMIENTO DE LOS RODILLOS VIBRATORIOS

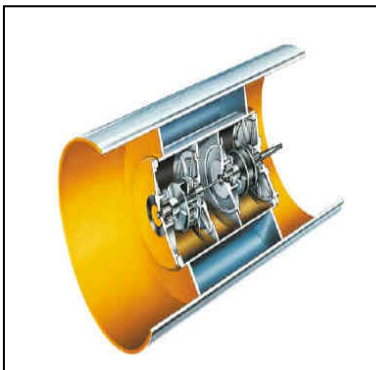
La Fuerza Centrífuga que genera un rodillo vibratorio viene dada por la expresión:

$$F_c = 4 \cdot \pi^2 \cdot P_o \cdot E \cdot f^2 \quad (14)$$

En la que  $F_c$  es la fuerza centrífuga,  $P_o$  es el peso de la masa excéntrica,  $E$  es la excentricidad con el eje de rotación del rodillo y  $f$  es la frecuencia en VPM del rodillo.

Como se podrá apreciar, la única variable que en la práctica incide en el valor de la fuerza centrífuga es la frecuencia de vibración, pues difícilmente cambia en obra el valor de la masa excéntrica y la excentricidad de dicha masa con respecto al eje de rotación del rodillo. Por ello es tan necesario que el ingeniero residente esté pendiente de la variación de la frecuencia del rodillo.

En la fotografía N° 10, se muestra el mecanismo que produce las vibraciones y la fuerza centrífuga en un rodillo vibratorio convencional, incluyendo la posición del eje de rotación del rodillo, la posición de las masas excéntricas y la excentricidad de dichas masas. Nótese que las masas están fijadas en el EJE DEL RODILLO.



*Fotografía N° 10: Posición del eje de rotación y de las masas excéntricas Fijadas al eje del rodillo vibratorio convencional.*

La causa más frecuente del mal funcionamiento de los rodillos vibratorios es la ignorancia por parte de los operadores de la necesidad de colocar la palanca que regula el giro de las excéntricas del rodillo en POSICION NEUTRA cuando se trata de cambiar de dirección entre pasadas sucesivas. Esto quiere decir que cuando el operador avanza en una dirección al compactar una capa, al llegar al final del lote debe poner la palanca en POSICION NEUTRA antes de pasarla a la posición de retroceso (dirección contraria). **La espera en posición neutra debe ser de unos diez segundos antes de pasar la palanca a la dirección contraria.**

Las excéntricas giran a alta velocidad y no resisten un cambio brusco de dirección por mala práctica del operador. Los rodillos mal operados tienden a funcionar mal a las pocas horas de trabajo y el operador no se percata de ello porque no tiene un tacómetro funcional en el tablero. Por ello es tan importante disponer de un tacómetro portátil para poder evidenciar a tiempo el mal funcionamiento de los rodillos.

La medición de la frecuencia con cierta regularidad tiene un gran beneficio para el propietario del rodillo, pues permite detectar a tiempo pérdidas expresadas en VPM que le indican que su equipo está siendo mal operado y que en algún momento deberá ir al taller para ser reparado.

En la obras en las que hemos tenido la responsabilidad de llevar el control de la frecuencia de los rodillos vibratorios, como una fase del control del patrón de compactación de capas de base para pavimentos; hemos podido constatar que al instruir a los operadores sobre el cuidado que deben tener al cambiar de dirección, se han reducido notablemente las paradas de rodillos para ser llevados al taller de reparación. Ello ha traído como consecuencia el logro de un mejor rendimiento de la máquina y el consecuente beneficio económico para el propietario.

Nuestra experiencia como inspectores de obras grandes de compactación nos permite asegurar que la mejor decisión económica que puede tomar un propietario de rodillos vibratorios es la que se refiere a invertir dinero en la formación de sus operadores. Esta inversión es de muy poco monto al compararla con lo que pierde cuando suma el monto de las inversiones requeridas para pagar reparaciones en el taller y las paralizaciones de obra.

Por lo general las instrucciones que proporcionan los fabricantes para la correcta operación de los rodillos vibratorios viene en idiomas distintos al castellano y los propietarios no se toman la molestia de traducirlas para que puedan ser leídas por sus operadores.

La formación de un buen operador de rodillo vibratorio, dejándolo apto para trabajar en el proceso de compactación de varios tipos de materiales cementados o no cementados, sólo toma un total de cuatro horas de campo y de oficina. Durante este lapso se le enseña al operador la forma correcta de trabajar con el equipo y cómo detectar cualquier falla de funcionamiento del equipo que implique desmejora del patrón de compactación del material.

## **RODILLOS VIBRATORIOS QUE OPERAN CON SISTEMA OSCILATORIO**

La empresa norteamericana HAMM ha puesto en el mercado un nuevo equipo de compactación que emplea el sistema oscilatorio en vez del sistema vibratorio convencional. En la realidad, se trata de un sistema combinado de compactador en el cual el rodillo delantero liso funciona con el sistema convencional de vibraciones verticales y el rodillo trasero

funciona con el nuevo sistema de oscilación horizontal. El compactador es el modelo HD090V y tiene un peso muerto de 20.100 Libras, y una fuerza centrífuga de 17.100 Libras por tambor, lo cual significa que trabaja con una aceleración de vibración de 1.70g.

La empresa HAMM reclama que el equipo HD090V proporciona un mayor porcentaje de compactación con menos pasadas que un compactador vibratorio convencional, por cuanto su rodillo trasero produce un mejor acomodo de partículas en el suelo que un rodillo vibratorio convencional. La máquina puede operar a velocidades comprendidas entre 0 y 9.4 MpH.

La diferencia fundamenta entre un rodillo convencional y un rodillo que opera con el sistema oscilatorio, radica en que el primer caso las masas excéntricas se encuentran fijadas en el eje del rodillo, mientras que en el segundo caso se encuentran fijadas en la vecindad de la plancha circular del tambor que está en contacto con el suelo.

En los diagramas N° 1 y 2, se presenta el principio del sistema de rodillos de compactación oscilatorio.

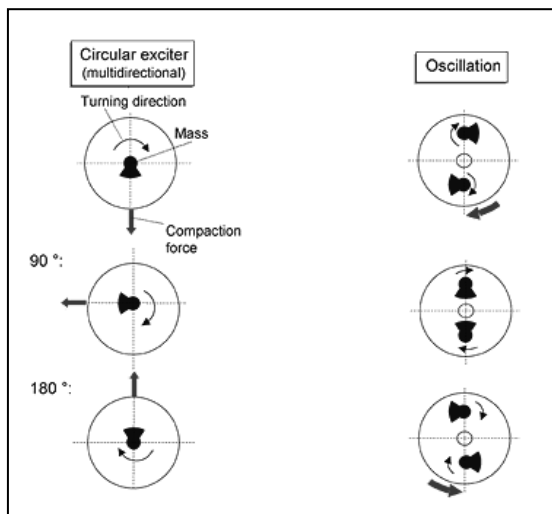


Diagrama N° 1

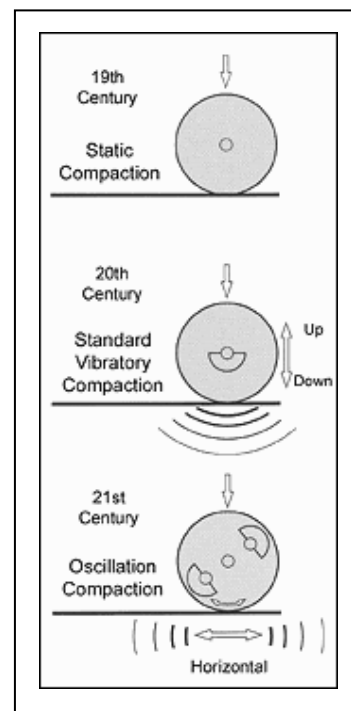


Diagrama N° 2

## **EMPLEO DE LAS PLANCHAS VIBRATORIAS PARA COMPACTAR LOTES DE SUELO DE DIMENSIONES REDUCIDAS EN LA VECINDAD DE ESTRUCTURAS Y EN EL FONDO DE ZANJAS**

En Venezuela se emplean equipos de compactación pequeños que reciben el nombre de “Ranas”, constituidos por planchas pesadas de acero que son activadas por un motor excéntrico ubicado sobre las mismas, el cual genera vibraciones de alta frecuencia que son transmitidas al suelo. También se emplean “Bailarinas” operadas con aire comprimido para suelo fino.

La frecuencia de vibración de las “Ranas”, debe ser determinada en obra apoyando el instrumento de medición en el plato del compactador y no en el motor del mismo.

La compactación de los rellenos en las zanjas es una actividad bastante riesgosa, que merece de la mayor consideración por parte de los ingenieros residentes de obra, por cuanto ocurren casos de desprendimiento de los suelos de las paredes de la zanja que pueden poner en peligro la integridad física de los trabajadores. Estos desprendimientos son causados por la propagación de las ondas desde el fondo de la zanja hacia las paredes de la excavación, las cuales no se encuentran bien entibadas o tienen una entibación débil y mal apuntalada.

Tan riesgoso es el uso de compactadores vibratorios en zanjas, que existen equipos operados por radio a control remoto, para evitar el empleo de operadores que puedan quedar afectados por un derrumbe de las paredes. En la fotografía N° 11 se muestra un compactador vibratorio para zanjas, marca Bomag modelo BMP851 de 8.000 Kilos de fuerza Centrífuga, el cual es operado a control remoto por medio de una radio cuyos controles se manejan desde la superficie del terreno.



*Fotografía N° 11*

Otro equipo utilizado para compactación de suelos granulares en zanjas es el que se muestra en la fotografía N° 12, el cual consiste en una plancha vibratoria colocada en el extremo de un brazo de excavadora, con la finalidad de mantener al operador fuera de la zanja.



*Fotografía N° 12*

La compactación de suelos granulares en la vecindad de las estructuras de concreto armado o de mampostería es una actividad que debe ser realizada con sumo cuidado, pues se dan casos de daño a las paredes y muros estructurales por choques debidos a la mala operación del equipo vibratorio usado para la compactación. En especial se debe evitar la compactación del suelo en la vecindad de la estructura cuando el encofrado ha sido retirado antes de los cuatro días después del vaciado y cuando el concreto tiene menos de siete días de edad. En las fotografías N° 13, 14 y 15, se muestran tres tipos de compactadoras vibratorias para ser empleadas en la vecindad de estructuras.



*Fotografía N° 13*



*Fotografía N° 14*



*Fotografía N° 15*

La sobre compactación de los materiales granulares de filtro que se colocan en contacto con el intradós de los muros de contención, trae el inconveniente del fracturamiento de los granos gruesos y el consiguiente cambio de granulometría del material, lo cual afecta la permeabilidad del suelo compactado por aumento la arena fina que pasa el cedazo # 40. Este fenómeno se observa en la compactación de las escorias de acería y en el caso de los suelos provenientes de rocas metamórficas esquistosas.

Cuando se descuida el proceso de compactación en la vecindad de estructuras se corre el riesgo de dañar el equipo y de que el operador sufra accidentes en sus extremidades inferiores.

## **CONCLUSIONES**

El diseño de un buen patrón de compactación para lograr la correcta densificación de un lote de suelo granular ya sea cementado, o no cementado, implica que el ingeniero de obra esté consciente de la necesidad de garantizar el buen funcionamiento del equipo de compactación.

La medición “*in situ*” de la frecuencia de vibración de los rodillos vibradores y de las planchas vibradoras exige del ingeniero residente el dominio de los aspectos teórico prácticos asociados con la compactación de materiales granulares. Además exige que se conozcan bien los principios de operación de los equipos y las causas de su mal funcionamiento.

La utilidad de los “Lotes de Prueba” debe ser muy bien comprendida por los ingenieros residentes, quienes deben acostumbrarse a un PATRON FIJO DE TRABAJO destinado a ordenar bien el procedimiento de ejecución y a generar un banco de datos que les pueda resultar de utilidad como documento de apoyo para proteger su actuación profesional.

Un buen ingeniero residente se debe ocupar de verificar que los operadores de los equipos de compactación entiendan bien el funcionamiento de los mismos y que eviten por todos los medios operarlos desatendiendo las recomendaciones contenidas en este artículo técnico.

Los empresarios dueños de equipos de compactación deben entender que obtienen mayor beneficio cuando asimilan que es preciso invertir tiempo y dinero en la formación de los operadores, sin importar si se trata de personal de planta de la empresa o de personal contratado a destajo, pues son los operadores quienes causan daño al equipo y los empresarios quienes deben evitarlo para no incurrir en bajas de rendimiento o en multas pecuniarias asociadas a la mala calidad del trabajo ejecutado.

Todo operador de un compactador debe recibir un curso de inducción sobre la forma segura de operar el mismo antes de ser empleado por el empresario para operar el equipo. Esta recomendación es válida *aún en el caso de operadores que hayan tenido experiencia previa*, pues no todos los materiales a compactar se compactan de la misma manera con el mismo equipo y un mismo equipo no siempre es el más adecuado para compactar todo tipo de material.

El acabado superficial de un lote depende del cuidado del ingeniero residente en seguir el proceso de compactación que se deriva del lote de prueba y que establece la frecuencia de operación del compactador y la velocidad de operación del mismo. La obtención de valores IRI altos en carpetas de rodamiento asfálticas está muy asociada a la mala operación de los equipos vibratorios de compactación por escasa vigilancia del ingeniero residente de la obra.

Basta con transitar durante una noche lluviosa por la superficie de una carpeta de rodamiento que ha sido compactada con un rodillo vibrador defectuoso, para que las luces del vehículo detecten la irregularidad de dicha superficie, sin necesidad de usar equipos sofisticados. Ello se debe a una inadecuada separación de impactos del rodillo por mala operación del mismo.

Estas conclusiones son el resultado de más de treinta años de trabajo del autor de este artículo técnico, durante los cuales se ha desempeñado como ingeniero residente de obras civiles y posteriormente como ingeniero inspector y consultor en grandes obras civiles venezolanas.

### **RECOMENDACIONES ESPECIALES PARA LA COMPACTACION DE CARPETAS DELGADAS DE CONCRETO ASFALTICO EN CALIENTE**

La compactación de carpetas delgadas de concreto asfáltico en caliente implica la realización de un trabajo delicado que no se puede dejar al criterio de personas inexpertas, pues por una parte se debe garantizar el acabado superficial con un valor IRI aceptable y por otra, se debe evitar el desplazamiento de la mezcla y la pérdida de temperatura con ganancia de viscosidad del cemento asfáltico.

Las carpetas de concreto asfáltico en caliente cuyo espesor es menor de 6 centímetros, tienden a desplazarse con el paso del vibrador cuando la fuerza centrífuga es mayor de 8.000 libras y la relación de aceleración es mayor de 1.5, notándose la aparición de grietas superficiales en la mezcla que tienden a ser paralelas al eje del rodillo.

Si se abusa de la vibración, se nota de inmediato que la mezcla caliente se desplaza hacia delante y que se forman huellas a los lados del rodillo. Por este motivo se ha llegado a la conclusión de que no conviene vibrar la mezcla recién colocada por la finisher, y que es preferible utilizar una aplanadora de rodillo liso de 6.000 libras sin vibración para asentar la mezcla hasta lograr un 90 % de compactación. De inmediato, y cuando el cemento asfáltico todavía conserva la viscosidad recomendada para la compactación, se le dan dos pasadas del mismo rodillo con 2.000 VPM operando a 3,5 Km./h, con lo cual se logra terminar la densificación del fondo de la carpeta y se termina el proceso de compactación con tres pasadas de equipo de 8.000 libras de peso sobre ruedas neumáticas infladas a 80 psi.

La experiencia ha demostrado que en los sitios abiertos, donde el viento sopla con fuerza, la mezcla pierde temperatura muy rápidamente y que por tal motivo es indispensable compactar la carpeta en un lapso no mayor de 10 minutos. Por ello, si se emplea vibración para compactar la carpeta de poco espesor, se corre el riesgo de espaciar los impactos a más de la mitad del espesor de la capa ( $> 0,5e$ ) y ello trae como consecuencia la aparición de ondulaciones en la superficie, lo que aumenta notablemente el valor IRI y genera reducción de pago muy importante, con serio perjuicio para el contratista.

En base a lo expuesto, se recomienda que el ingeniero residente trabaje con mucho cuidado en un par de lotes de prueba antes de establecer el patrón de compactación de carpetas delgadas de concreto asfáltico en caliente y que utilice un medidor de espesores para detectar sitios donde la carpeta es muy delgada ( $e < 3$  cm.). Se recomienda el empleo del medidor de espesores TROXLER, el cual viene dotado con un lector digital como el que se muestra en las fotografías N° 16 y 17.



*Fotografía N° 16: Equipo Troxler para medir espesores in situ en carpetas de concreto asfáltico*



*Fotografía N° 17: Detalle del medidor de espesores Troxler con termopar incorporado.*

## **AGRADECIMIENTO**

El autor desea expresar su más profundo agradecimiento a la Ingeniero Civil Valentina Martín M., quien pacientemente revisó y corrigió el texto del presente trabajo.

## **REFERENCIAS**

- Amick, Hal.A Frecuency\_Dependend Soil Propagation Model. Colin Gordon y Asociates. San Mateo.California USA. SPIE Conference on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical Sistems. Denver Colorado. Julio 1.999.
- Barkan, D.D. Dynamics of Bases and Foundations. Mc Graw-Hill Book Company. Inc. New York, 1962, Traducción del Ruso, páginas 60 a 73.
- Centeno Werner, Roberto Rafael, Inspección y Control de Obras Civiles, Editorial Vega Caracas, 1982. Páginas 18 a 20.

## **LECTURAS RECOMENDADAS**

Rico Rodríguez Alfonso y Del Castillo Mejía, Hermilio. Consideraciones sobre Compactación de Suelos en Obras de Infraestructura del Transporte. Documento Técnico No 7. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte, 1999 ISSN-0188-7114.

## **CONSULTAS RECOMENDADAS EN INTERNET**

- Artículo 512. Oct 10/02. [www.carreteros.org/pg3/articulos](http://www.carreteros.org/pg3/articulos).
- [http://www.hammcompactors.com/osch\\_osc\\_technology/html](http://www.hammcompactors.com/osch_osc_technology/html)
- [http://www.colingordon.com/pdf/amick\\_SPIE99](http://www.colingordon.com/pdf/amick_SPIE99)