## ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES INDUCIDAS EN EL TERRENO POR COMPACTACIÓN CON RODILLO VIBRATORIO Y SU RELACIÓN CON DESLIZAMIENTOS EN OBRAS LINEALES

JIMÉNEZ GUIJARRO, Pablo. ICCP, DEA en Ingeniería del Terreno, KV Consultores RUBIO GARCÍA, Francisco. ICCP. D.E.A. Ingeniería Civil. HERNÁNDEZ GARVAYO, J. Carlos. ICCP. D.E.A. Ingeniería Civil. Geotécnica del Sur, S.A. HERNÁNDEZ DEL POZO, Juan Carlos (Doctor Ingeniero de Caminos, Profesor titular de Geotecnia de la Universidad de Granada)

### RESUMEN

Durante la compactación que se realizan en terraplenes con equipos de tipo dinámico como el caso de la compactación con rodillo vibratorio, el suelo se ve sometido a dos tipos de movimientos, uno de cambio de posición relativa de las partículas y otro ondulatorio debido a las deformaciones por compresión debido a los esfuerzos alternativos a los que se ve sometido por el equipo de vibración utilizado. Estos esfuerzos podrían asemejarse al efecto de un seísmo de baja intensidad que afecta solo a las capas superiores, pero que en caso de deslizamientos superficiales, así como en el caso de deslizamientos preexistentes en equilibrio estricto, este fenómeno puede dar lugar a la activación del movimiento de ladera. En esta comunicación se hace un repaso de los datos preexistentes. Nos basamos en ellos para realizar una primera aproximación del comportamiento en profundidad de las vibraciones, modelizando la distribución de esfuerzos y vibraciones en el terreno mediante una ley de tipo logarítmico, llegándose a la conclusión de que este fenómeno con su correspondiente factor de seguridad puede alcanzar una profundidad de hasta seis metros. Se deja abierta la línea de investigación para la realización de mas ensayos de contraste a mayores profundidades que los existentes

### 1.- COMPACTACION DE UN SUELO SOMETIDO A VIBRACIÓN

Durante la vibración de un suelo se pueden observar en sus partículas dos tipos de movimientos. Uno es de cambio de posición relativa de unas respecto a otras. Esto da lugar a asentamientos permanentes, una vez que cesa la vibración.

El otro es el movimiento ondulatorio de las partículas debido a las deformaciones por compresión de cada grano, ocasionadas por los esfuerzos alternativos a que se le somete el equipo de vibración utilizado. En La práctica, este movimiento oscilatorio suele ser esencialmente de dirección vertical. Un modelo elemental lo vemos en la figura 1.



FIGURA 1. Granos esféricos oscilando verticalmente bajo la acción de un vibrador de peso W

En la fase de expansión las reacciones entre los mismos disminuyen. Las horizontales llegan a anularse. En la compresión aumentan tanto las verticales como las horizontales.

Durante la expansión se reducen las acciones horizontales entre granos y experimentalmente se comprueba que la resistencia a esfuerzos cortantes durante la vibración decrece drásticamente (Rojo López, J., 1988). Los suelos reales se componen de granos que, a diferencia de las bolas, tienen ciertas fuerzas de ligazón entre sí, según sea la naturaleza y estado de los mismos. Cuanto menores sean estas fuerzas más se acercarán en la vibración al esquema de las bolas.

Las deformaciones que se observan en el terreno debido a estas fuerzas dinámicas son de tres tipos (Oliveros Rives, F., 1957):

- Deformación elástica
- Deformación Plástica
- Nueva disposición de las partículas

Hay que tener en cuenta que, al compactar un suelo, se tiende a evacuar parte de agua y gas intersticiales. La vibración favorece el movimiento de estos elementos.

### 2.- EFECTOS DEL RODILLO VIBRATORIO.

En primer lugar, vamos a hacer un breve resumen de los fenómenos a que da lugar el paso de un rodillo vibrante sobre una capa de terreno.

El rodillo transmite al suelo, a través de las zonas de contacto, una serie de esfuerzos cuya intensidad varía cíclicamente según una ley sinusoidal. Si no se tiene en cuenta el pico de aceleración producido por cuando el rodillo contacta con al superficie del terreno en caso de levantamiento de este, las vibraciones parecen prácticamente armónicas (D'Appolonia, 1969).

Estas pulsaciones se transmiten al terreno primordialmente en forma de ondas de compresión, cuyo origen es la zona de contacto rodillo-suelo. Cuando un suelo es sometido a vibración, se producen tres trenes de ondas distintos (Simic, 2004), un frente semiesférico P de ondas de compresión que se desplaza a mayor velocidad por la fase liquida del suelo,

mientras que las ondas de corte (ondas S y las ondas Rayleigh) producen tensiones tangenciales cíclicas que generan un crecimiento de las presiones intersticiales, hasta el punto de que en caso de que las tensiones efectivas se anulan tendrá lugar el proceso denominado licuefacción.

A la hora de evaluar la respuesta de un suelo sometido a vibración, hay que tener en cuenta la naturaleza de este, pues no responden igual los suelos cohesivos que los granulares.

### 2.1. Suelos Granulares

La acción de una vibración en un material granular produce una reducción del índice de huecos del material, dando lugar a un aumento de la densidad relativa del material. Si dichos materiales están saturados, parte de la energía inducida por la vibración se trasmitirá al agua intersticial.

### 2.2. Suelos Cohesivos

La respuesta de estos suelos a la vibración se ve complicada por el hecho de que se produce consolidación. La vibración produce una sobrecarga instantánea que se trasfiere al agua intersticial de forma local, creando sobrepresiones intersticiales cuya disipación se ve acelerada por la creación de caminos preferentes de drenaje originados por la fractura hidráulica del suelo así como por la rotura a esfuerzo cortante.

# 2.3. Factores que influyen en el comportamiento de un suelo sometido a al paso de un rodillo vibrante.

Los principales parámetros que afectan a un suelo sometido al paso de un rodillo vibrante son función de los parámetros del material, los parámetros de la rodillo vibrante, los de aplicación y los de condiciones de operación del rodillo (J. Brandl, 2001).

Parámetros del material:

- Tipo de suelo
- Huso granulométrico
- Forma de las partículas
- Humedad natural
- Limites

Parámetros del rodillo vibratorio:

- Dirección de la fuerza dinámica resultante
- Frecuencia de la excitación
- Amplitud de la excitación
- Diámetro del rodillo
- Peso del Rodillo

- Rigidez de las capas
- Espesor de las capas
- Rigidez y parámetros resistentes de la capa subyacente
- Propiedades de la transición entre las distintas capas
- Ratios de peso entre el peso del rodillo y el total de la máquina
- Masa del rodillo, la masa que gira excéntrica, el bastidor y sus ratios
- Geometría y forma del rodillo (cilíndrico, poligonal...)
- Condición del rodillo
- Autopropulsado o arrastrado

Parámetros de la Aplicación:

- Numero de pasadas del rodillo

- Velocidad y dirección de las pasadas

- Inclinación del área de paso del rodillo

- Forma de la superficie, inclinación y regularidad de la capa.

Parámetros de operación (rodillo vibratorio): - Contacto continuo

- Levantamiento parcial (perdida parcial de contacto)

La velocidad de las ondas depende de las características mecánicas del terreno en el momento considerado.

La intensidad de los efectos de estas ondas se amortigua no sólo por repartición de su energía a través de la superficie de la onda, creciente con el cuadrado de su distancia a la zona de perturbación, sino también por efecto de las pérdidas sufridas por rozamiento interno entre las partículas afectadas, y que son en posición

o deformadas bajo los efectos de las compresiones y tensiones cortantes transmitidas.

Por esta razón, en el terreno se producen movimiento vibratorios cuya amplitud es menor a medida que el punto está más alejado del rodillo vibrante (Rojo López, J., 1988).

En la figura 2 se muestra la distribución de la amplitud de las vibraciones aparecidas en la superficie en las proximidades de un rodillo

Han sido medidas en diversos ensayos en puntos situados a distinta profundidad y separación de la vertical del centro del rodillo.

Debido a la gran velocidad de propagación de las ondas, el desfase en las vibraciones de los puntos alcanzados es prácticamente nulo, pues cuando el desfase empieza a ser apreciable la amplitud es despreciable.

Si nos fijamos en una sección vertical del suelo perpendicular a la marcha de rodillo, antes de que llegue a



FIGURA 2. Amplitudes de vibración a diferentes profundidades y distancias

pasar sobre la misma el rodillo ha sido sometido a una serie de ciclos de vibración de intensidad creciente, pero que en las proximidades de cilindro están en fase y con amplitud casi igual

### 3.- TENSIONES Y DEFORMACIONES DE UN SUELO SOMETIDO A VIBRACIÓN.

En la figura 3 se presentan los resultados experimentales de medidas de presión de un punto bajo el suelo, mientras un rodillo vibrante se acerca a dicho punto, desplazándose a velocidad constante.

Podemos considerar el valor de la presión en cada instante como suma de tres componentes:

- 1º La debida al peso del suelo que está sobre la célula.
- 2º La debida al peso del rodillo.
- 3º La debida a la vibración.

La debida al peso del suelo que está sobre el punto considerado es constante. La debida al peso del rodillo es variable, aumentando al acercarse el rodillo al punto considerado y disminuyendo al alejarse.

La debida a la vibración es alternativa. Su intensidad es variable en forma cíclica y podemos considerarla proporcional a la deformación. La amplitud de esta oscilación varía de forma parecida a la anterior. Su frecuencia es prácticamente la misma que la del vibrador, ya que el efecto Doppler es despreciable a la velocidad de traslación del rodillo

Si se aumentara la amplitud de la vibración se tendrían mayores facilidades para el reacondicionamiento entre los granos, con lo que se obtendrían mayores deformaciones instantáneas y residuales.

Forssblad (1965) hizo medidas del esfuerzo a que se ve sometido el suelo en



FIGURA 3. Presión y deformación de un punto bajo el suelo

función de la frecuencia del rodillo vibratorio a una profundidad de aproximadamente 40 cm bajo la superficie del terreno, demostrando los resultados que obtuvo que el esfuerzo dinámico aumenta significativamente cuando la frecuencia de operación del rodillo aumenta. Sin embargo, una vez que la frecuencia de resonancia del terreno es alcanzado, estos esfuerzos dinámicos aumentan a una tasa mucho menor.

La frecuencia de operación del rodillo tiene un gran efecto tanto en la aceleración a la que se ve sometida el suelo como en el esfuerzo dinámico al que se ve sometido, especialmente en profundidades reducidas. La fuerza dinámica actuando en el terreno es proporcional al frecuencia de operación del rodillo, y por lo tanto, hasta la resonancia, todos los componentes de aceleración y tensión dinámica deben crecer (D'Apolonia 1969)

También se consigue una ventaja muy importante al crecer la amplitud de vibración: se obtienen efectos en mayor profundidad, aun conservando el mismo peso del rodillo, sobre todo si el rodillo llega a despegarse del suelo y se producen impactos al volver a caer.

Las magnitudes tanto del esfuerzo dinámico como de la aceleración son esencialmente independientes del número de pasadas del rodillo (Withman, 1969)

#### 3.1. Medida de Tensiones verticales.

Diversos autores han realizado experimentos en los cuales han medido el esfuerzo vertical al que se ve sometido el terreno por el paso del rodillo vibratorio así como de la aceleración vertical que sufre a distintas profundidades.

La figura 4 muestra los resultados típicos para un rodillo con despegue de Aceleración vertical del rodillo, aceleración vertical del terreno y tensión vertical del mismo en función del tiempo.

El punto A se identifica como aquel en el que el rodillo contacta con la superficie del suelo, Esto causa un aumento de la aceleración vertical del rodillo hasta un punto A' y un aceleración de descenso del suelo. Antes del impacto en el punto A, la presión en el terreno es pequeña y se incrementa rápidamente hasta que el rodillo llega al punto A'. En el punto B, el rodillo esta en su punto más inferior y la aceleración vertical ascendente en el suelo es máxima cuando el suelo comienza a rebotar. Las tensiones en el suelo son ligeramente inferiores que el máximo y decreciendo. En el punto D, el rodillo esta en su máxima elevación y por tanto la tensión de contacto entre el suelo y el rodillo es nula. Consecuentemente, el suelo esta en caída libre hasta que el rodillo vuelve a hacer contacto en el punto A, donde comienza un nuevo ciclo de carga.



FIGURA 4. Aceleración vertical del rodillo, Aceleración vertical del suelo y tensión vertical en el terreno.

Las tensiones verticales son mayores cuando el rodillo esta justo en la vertical de un punto (Figura 5), disminuyendo rápidamente cuando nos alejamos del punto y con la profundidad.

La medición de las tensiones verticales con los parámetros indicados en la Figura 5, nos da la





FIGURA 5. Líneas de Igual presión máxima vertical (dinámica) bajo un rodillo

FIGURA 6. Medición de las presiones verticales

figura 6 (Lambe, 1995).

Como puede verse, la disminución de las presiones sigue una ley Logarítmica del tipo:

$$Y = -a Ln(x) + b$$

Se puede apreciar como las tensiones disminuyen al aumentar la profundidad a la cual se miden las tensiones. De hecho, y siguiendo la formula logarítmica que se extrapola del gráfico, y = -0,4615Ln (x) + 0,4228; estas tensiones se anulan para 2,499 m  $\cong$  2,5 m (FIGURA 7).



Con respecto a las aceleraciones verticales, La figura 8 nos muestra las máximas aceleraciones verticales en función de la profundidad bajo el rodillo.



FIGURA 7. Medición en escala logarítmica de las presiones verticales

Si comparamos las mediciones de D'Appolonia con el estudio de simulación numérica de la compactación de suelos granulares con rodillos vibratorios realizada por Kelm y Grabbe (2001), tenemos los siguientes resultados (Figura 9):



FIGURA 9. Comparación de resultados medidos por D'Appolonia frente a los datos de simulación numérica de Kelm y Grabbe . Rodillo funcionando a 30 hz., Amplitud = 1,8 mm.



FIGURA 8. Máxima aceleraciones bajo el paso de un rodillo.

Estas aceleraciones pueden verse en los siguientes gráficos, así como puede relacionárseles una ecuación que modelice el comportamiento en profundidad, para un rodillo de 12.5 Kilolibras (aprox. 5700 Kg.) y 27,5 ciclos por segundo:







FIGURA 11. Datos de Kelm y Grabbe. Aceleración vs. Profundidad.



FIGURA 12. Datos comparados D'Appolonia vs Kelm y Grabbe. Aceleración vs. Profundidad.

Como puede verse la relación teórica calculada por Kelm y Grabbe se queda del lado conservador para profundidades pequeñas, si bien para profundidades mayores de 1,5 metros aproximadamente, predice vibraciones en el terreno mayores que las medidas por

D'Appolonia. Esto se debe a que el estudio de Kelm y Grabbe busca la profundidad óptima de compactación, que para ella es aquella que produce en el terreno una aceleración de 1 g, resultando para este valor bastante correcta la modelización realizada, pero fallando en mayor profundidad

Si bien cabe destacar que en ambos casos las dos curvas siguen al igual que en el caso de las presiones una ley logarítmica.

Si representamos los valores de empíricos de Dáppolonia conjuntamente con los calculados por Kelm y Grabbe pero obviando el último dato de estos para aceleración de 0,5 g x m/s2, al ser el que más se aleja de la realidad empírica, obtenemos un gráfico como el que sigue:



FIGURA 13. Datos conjuntos D'Appolonia - Kelm y Grabbe. Aceleración vs. Profundidad.

Se aprecia que asimismo sigue una ley logarítmica. Para el caso de D'Appolonia, los cálculos teóricos de Kelm y Grabbe y de para el caso conjunto, la vibración se anularía para las siguientes profundidades:

- D'Appolonia: X = 2,749 m  $\cong$  2,75 m



FIGURA 14. Datos D'Appolonia en escala logarítmica. Aceleración vs. Profundidad.

- Kelm y Grabbe: 3,794 m  $\cong$  3,80 m



FIGURA 15. Datos de Kelm y Grabbe en escala logarítmica. Aceleración vs. Profundidad.

- Datos Conjuntos (D'Appolonia + Kelm y Glebber): X = 3,154 m  $\cong$  3,15 m



FIGURA 16. Datos conjunto Dáppolonia - Kelm y Grabbe en escala logarítmica. Aceleración vs. Profundidad.

### 4.- DISCUSIÓN

Es obvio que durante la compactación que se realizan en terraplenes con equipos métodos de tipo dinámico se inducen unas fuerzas y unos movimientos de tipo ondulatorio que podrían asemejarse al efecto de un seísmo de baja intensidad que afecta solo a las capas superiores.

Como hemos visto en el análisis de los datos preexistentes, estas vibraciones afectan, con los equipos que se ha utilizado para los experimentos a profundidades del entorno de los cuatro metros.

Asimismo se ve que tanto las tensiones como las vibraciones inducidas en profundidad en el terreno se pueden asemejar a una función logarítmica y es por lo tanto predecible como se atenúan en profundidad estos valores según dicha ley.

Si aplicamos un coeficiente de seguridad de 1.5, este espesor afectado alcanza los seis metros, empezando a tener el fenómeno una importancia mayor de la que e le puede atribuir inicialmente en caso de deslizamientos superficiales, así como en el caso de deslizamientos preexistentes que se encuentran en equilibrio estricto. Así, este fenómeno puede dejar de ser despreciable y dar lugar a la activación del movimiento de ladera.

Sin embargo en esta primera aproximación se han usado datos preexistentes y de maquinaria con mas de treinta años de antigüedad. EL creciente desarrollo de la maquinaria de compactación de rodillo vibratoria cada vez saca al mercado unidades con mayor peso y con mayores frecuencias. Esto hace que nuestra aproximación, pueda ser considerada como muy conservativa, pudiendo aventurarse que el efecto de la vibración con su correspondiente coeficiente de seguridad de 1.5 pueda alcanzar profundidades de ocho, o incluso diez metros de profundidad.

### **5.- CONCLUSIONES**

Como conclusiones de este estudio podemos citar las siguientes:

- Durante el proceso de compactación se inducen unas fuerzas y unos movimientos de tipo ondulatorio en el terreno que podrían asemejarse al efecto de un seísmo de baja intensidad.
- En caso de deslizamientos superficiales, así como en el caso de deslizamientos preexistentes que se encuentran en equilibrio estricto, este fenómeno puede dejar de ser despreciable y dar lugar a la activación del movimiento de ladera.
- No es igual el comportamiento ante la compactación con vibración de suelos granulares y cohesivos, factor que debe tenerse en cuenta.
- Las tensiones y movimientos inducidos en el terreno se ajustan a una ecuación logarítmica del tipo Y = -a Ln (x) + b.
- La profundad donde este efecto desaparece, basado en los datos preexistentes es de aproximadamente cuatro metros, por lo que, aplicando un coeficiente de seguridad de 1.5, podemos alcanzar profundidades de seis metros.
- El uso de maquinaria cada vez mas pesada y con mayores frecuencias de oscilación puede hacer que este fenómeno pueda alcanzar profundidades de ocho diez metros o incluso mayor profundidad.
- Para deslizamientos superficiales la energía inducida por la vibración debe ser un factor más a tener en cuenta a la hora de calcular la estabilidad de las laderas.
- Es necesaria la realización de mas ensayos de contraste a mayores profundidades que los existentes, y con equipos más potentes así como con distintas frecuencias de vibración y en distintos tipos de materiales para poder realizar una mejor aproximación al problema.
- Asimismo se debe tener en cuenta la posibilidad de que otros tipos de vibraciones inducidas por otros sistemas de compactación (compactación dinámica clásica, compactación con explosivos...) puedan asimismo tener un efecto similar al del rodillo vibratorio.

### 6.- BIBLIOGRAFÍA

Rojo López, J. (1988). "Teoría y Práctica de la compactación". Dynapac. Madrid.

Oliveros Rives, F. (1957). "Compactación de suelos por vibración". Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento. Madrid.

Brandl, H. (2001). "The importance of optimum compaction of soil and other granular material". Outcome of European Technical Committee n°11 of International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. A.A. Bakema Publishers. Lisse/Abingdon/Exton/Tokyo.

Adam, D. y Merkiewicz, R. (2001). "Compaction Behaviour and depth effect of the Polygon – Drum". Outcome of European Technical Committee nº11 of International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. A.A. Bakema Publishers. Lisse/Abingdon/Exton/Tokyo.

Brandl, H. (2001). "Compaction of Soils and other granular material – Interactions". Outcome of European Technical Committee n°11 of International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. A.A. Bakema Publishers. Lisse/Abingdon/Exton/Tokyo.

Pinard, M.I. (2001) "Developments in Compaction Technology". Outcome of European Technical Committee n°11 of International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. A.A. Bakema Publishers. Lisse/Abingdon/Exton/Tokyo.

Cuellar, V., Valerio, J. (1998). "Aplicación del Análisis Espectral de las Ondas Superficiales para evaluar la eficacia de diversas técnicas de mejora del terreno". Revista Ingeniería Civil, nº 109.

Arredondo y Verdú, F., Jiménez Martín, F., Jiménez Salas, J.A., Llamazares Gómez, O., de Navacerrada Farias, G., Sendín, M., Villamil, P. (1966). Compactación de Terrenos, Terraplenes y Pedraplenes. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona.

D'Appolonia, D.J., Whitman, R.V., Dáppolonia, E. (1969) "Sand Compaction with Vibratory Rollers". Journal of the Soils Mechanics and Foundation Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers.

Lambe, T., Whitman, R.V., (1995). "Mecánica de Suelos". Noriega Editores. México D.F.

Kelm, M. y Grabbe, J. (2004). "Numerical simulation of granular soils with vibratory rollers". Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena. Ed. Triantafyllidys. Taylor and Francis Group, Londres.