

# Método y Equipos De Compactación De Suelos.

Manuel Alejandro Romero Quintero, Estudiante de Ingeniería Civil<sup>1</sup>, y Yeison Stid Bohorquez Contreras, Estudiante de Ingeniería Civil<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Universidad La Gran Colombia, Colombia, [manuelalejandro.romero@ulagrancolombia.edu.co](mailto:manuelalejandro.romero@ulagrancolombia.edu.co)

<sup>2</sup> Universidad La Gran Colombia, Colombia, [yeisonstid.bohorquez@ulagrancolombia.edu.co](mailto:yeisonstid.bohorquez@ulagrancolombia.edu.co)

*Resumen - La eficacia de la compactación que se puede lograr con la elección adecuada del equipo, para maximizar la energía de compactación necesaria para lograr una óptima condición de compactación en suelo, es posible determinarlo por medio de ensayos de laboratorio, pero teniendo en cuenta que son varios los métodos y sistemas de compactación utilizados en campo como lo son la presión estática, por impacto, y por vibración, haciendo difícil estandarizar un método que nos cumpla con las condiciones técnicas, para lograr o determinar el contenido de humedad óptimo dependiendo el tipo de suelo, con el cual se logra una máxima densificación del suelo, cuando se proporciona la adecuada energía de compactación. Carlos Lopez Jimeno; Graficas Arias Montejo S.A Mostoles (Madrid) [1].*

*En este artículo se presenta las diferentes técnicas desarrolladas para la compactación de suelos utilizados en la actualidad en Colombia, como se adoptaron y adaptaron procedimientos de otros países como México, España, y Estados Unidos. Los cuales se fueron modificando a través de los años, desarrollando técnicas propias que permitieron mejorar la consolidación de un suelo, de igual forma se presentara las diferencias de técnicas y equipos utilizados en la actualidad en Colombia y México para la compactación de suelos. Específicamente en la construcción de sub-bases y bases para infraestructura vial.*

**PALABRAS CLAVES:** compactación, laboratorio, presión estática, impacto, vibración, densificación, consolidación, sub base, base, infraestructura.

## 1. INTRODUCCION

En el siguiente artículo hablaremos de la incidencia, en la elección y adecuada utilización de equipos, para optimizar eficientemente la utilización de la energía de compactación para un suelo. En Colombia existe una diversidad de materiales como lo son la sub-base granular, base estabilizada, base granular de tipo a, b, y c. como las más requeridas hoy en día para el mejoramiento de suelos en infraestructura vial, los cuales se han venido explotando de las canteras para mejorar las necesidades básicas en pro del desarrollo del país, y así mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Obras de gran envergadura como vías, edificaciones, puentes y entre otras, especializadas de ingeniería civil, requieren de grandes cantidades de

materiales que permitan el desarrollo de estas, la importancia de conocer nuestros suelos en las distintas regiones del país, es clave para dar un soporte técnico que permitan desarrollar procesos y procedimientos de compactación que garantice la estabilidad de dichos proyectos.



Fotografía No. 1. Cantera Medellín extracción bases granulares (Equipamientos industriales s.a.s).

Se pueden realizar los diferentes ensayos de laboratorio (proctor normal, proctor modificado, proctor estándar) conociendo que los suelos presentan propiedades y características particulares que los hacen únicos, teniendo en cuenta esto se hace necesario implementar procesos en campo que nos permitan un adecuado proceso de densificación, a diferencia con los procesos de laboratorio se puede lograr las siguientes condiciones, densidad relativa, resistencia al corte, disminución de permeabilidad, susceptibilidad a los cambios volumétricos y por su puesto una muy alta densidad, todo esto se logra con los ensayos de proctor estándar, proctor modificado; pero ni en las mejores condiciones de diseño de la estructura de un suelo en campo es posible lograr todas estas características en un alto porcentaje según requerimientos exigidos por la norma de la ASSHO, ASTM y MOPT según lo requiera el diseño. El propósito de este artículo es analizar y comparar la energía de compactación necesaria para lograr una óptima condición de

compactación en campo u obra. (Cox L, Walker A, Welch SJ (1996) [2].

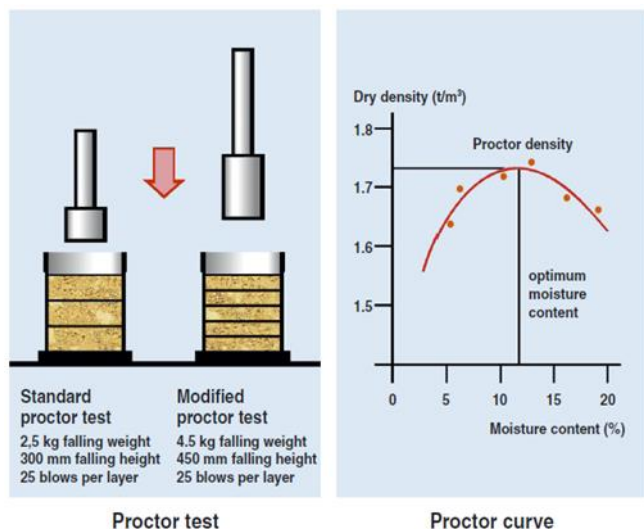


Figura No. 1. Ensayo y curva proctor . (Germany, Bomag Americas inc 2000, kentville, road,kewanee).

En Colombia el conocimiento geotécnico detallado de los materiales involucrados. Es de suma importancia y estricto control, ya que se utilizan principalmente materiales disponibles en el sector de emplazamiento de la obra, sobre los que se aplican técnicas de mejoramiento de suelos como son, la presión estática, por impacto, y por vibración , con el objetivo de mejorar su comportamiento y disminuir los espesores de diseño en cada una de las capas que se forman, es decir una compactación del suelo, con el propósito de disminuir el espesor de las bases a los mínimos reglamentarios según uso y funcionalidad de la estructura de suelo, que estaría entre 15 cm y 30 cm de espesor. .( Soil enzyme activities as integrative indicators of soilhealth.) [3]

## 2. ANTECEDENTES CONTEXTO NACIONAL

Según artículo realizado por Darina Lara Coba; Miguel Herrera Suárez y Ciro E. Iglesias Coronel, Sensoramiento continuo de la compactación del suelo: revisión y análisis, el cual se basaba en implementar una alta gama de dispositivos de medición de las propiedades de suelo, son unos sensores eléctricos, electromagnéticos, ópticos, y radiométricos, estos equipos fueron utilizados para medir la resistencia mecánica del suelo, estas mediciones son utilizadas posteriormente para estimar la compactación del suelo, como se menciona en el desarrollo de su artículo son varios los factores que afectan los procesos de compactación del suelo pero los más importantes son: la humedad y el contenido de arcilla, así como la profundidad y ancho de trabajo como parámetros de operación. Tomando en cuenta estos aspectos varios investigadores han desarrollado ecuaciones que le permiten

correlacionar las lecturas del sensor con la magnitud de la compactación del suelo medida a partir de la densidad aparente, en las que incluyen tanto las variables de operación del sensor como las caracterizan su estado físico, siendo un factor determinante las características del sensor y su principio de funcionamiento. A partir de esto Andrade et al. (2002) desarrollan una ecuación para predecir el estado de compactación del suelo, correlacionando la fuerza requerida para el corte del suelo con la densidad seca, en dicha ecuación se incluye la humedad como una importante variable que define el estado del mismo, así como la profundidad y el ancho de trabajo; con la necesidad de determinar de manera simultánea las variables necesarias para correlacionar la lectura del sensor con la compactación de suelo, ha dado lugar al desarrollo de sensores multipropósitos, que son capaces de sensar la resistencia del suelo, humedad, y textura del suelo, entre otras además de los parámetros de operación. (LARA COBA, Darina; HERRERA SUAREZ, Miguel e IGLESIAS CORONEL [4].

En nuestro país la compactación superficial es la que se consigue mediante el paso de elementos compactadores sobre la superficie del terreno. Esta técnica se realiza en Colombia, usualmente para construcción de rellenos, terraplenes o presas de materiales sueltos. Se hace por medio de la hidratación y presión mecánica el cual produce un aumento en su densidad (densidad aparente), aumenta su resistencia mecánica, destruye y debilita su estructuración. Todo esto hace al disminuir la porosidad total y la macroporosidad (porosidad de aireación) del suelo.

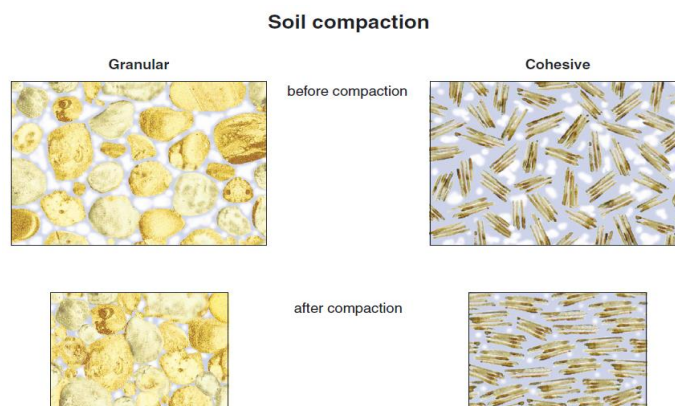


Figura No. 2. Compactación de suelos granulares y cohesivos. (Germany, Bomag Americas inc 2000, kentville, road,kewanee).

La compactación es un proceso rápido. La actuación de los elementos compactadores sobre cada punto dura escasos segundos, por lo que no da tiempo a que se produzca expulsión de agua del interior del terreno. El proceso tiene lugar sin drenaje, por lo que sólo tiene sentido en el caso de suelos parcialmente saturados. En un suelo saturado en el que

no se produce variación del contenido de agua, el volumen no varía, al ser incompresibles tanto el agua como las partículas sólidas.

Existen unos procesos de compactación para humedades altas, donde se llega casi a alcanzar la densidad límite. Para humedades bajas, el rozamiento entre partículas dificulta mucho la compactación y la densidad alcanzada queda muy por debajo. Actualmente existen soluciones, como superficie estilolítica (compactación química) Grainstone bioclástico con detalle de contactos estilolíticos entre Nummulites, e importante reducción del espacio intergranular, como respuesta a la compactación química, pero lamentablemente son químicos altamente tóxicos y nocivos para el hombre, además de un precio demasiado elevado que las ciudades y países (como el nuestro) no puede costear.

La compactación está siempre acompañada de la pérdida de volumen de poros especialmente de los más grandes. Esto causa pérdida en la permeabilidad al aire, en el flujo de agua y de iones. Y cambios negativos en la porosidad total del suelo y en la distribución del tamaño de los poros, causan cambios en los procesos de compactación, está también asociada a la baja estabilidad estructural del suelo frente al agua (Gavande, 1982), lo cual causa en la compactación. Un suelo con estructura débil aumenta su cohesión entre partículas, disminuyendo la independencia de cada agregado y microagregado, con lo cual se reduce el espacio poroso y se hace más susceptible a la compactación. Factores que inciden con relación a la maquinaria de compactación de suelos permiten tener un mayor control como lo es a mayor peso de la maquinaria mayor posibilidad de compactar el suelo y mayor profundidad puede alcanzar la compactación, si el peso de la maquinaria es uniforme, por ejemplo mayor peso en ruedas traseras, la presión ejercida por éstas sobre el suelo será mayor, si el peso de la maquinaria se distribuye en un área mayor (neumáticos más anchos), la presión sobre el suelo será menor que en el caso de usar neumáticos más angostos, mientras más inflados los neumáticos, menor es el área del neumático que entra en contacto con el suelo y mayor es la presión sobre el suelo, en la medida que estos fenómenos se produzcan, el esfuerzo producido sobre el suelo es mayor. Se sugiere realizar el trabajo evitando el patinaje y zapateo de los neumáticos. La velocidad de trabajo cuando la presión sobre el suelo es mantenida por un mayor tiempo el fenómeno de compactación tiene una mayor posibilidad de producirse, por lo que sería adecuado realizar las labores a una velocidad lo más alta posible. Número de pasadas de la maquinaria a mayor número de pasadas, mayor es la compactación que se

produce en el suelo. JAKAB,G.; NÉMETH, T.; CSEPINSZKY, B., MADARÁSZ, B., SZALAI, Z. &[5].

Profundidad de trabajo del implemento de laboreo de suelos, el extremo inferior de cualquier implemento de laboreo de suelos va a ejercer un esfuerzo vertical sobre el suelo, por lo que la mantención de una misma profundidad de laboreo va a producir la compactación del suelo bajo esta profundidad (pie de arado), por lo que es recomendable variar la profundidad de las labores.

Las características físicas y propiedades mecánicas del suelo (textura, tipo y estabilidad de la estructura, densidad aparente, carga histórica, resistencia a la deformación).Contenido de humedad del suelo: a mayor contenido de humedad, el suelo puede deformarse y compactarse con menores presiones recibidas. Por lo tanto, las labores deben realizarse con el suelo lo más seco posible.

Una investigación realizada para suelos en caldas palestina, en el aeropuerto del café sobre el control de compactación con presencia de materiales volcánicos, muestran las relaciones encontradas entre la densidad de campo alcanzada por el material y su humedad de compactación, y se evalúa la predicción de la diferencia entre la humedad óptima del material y la humedad de compactación de campo, estimada por el método aproximado propuesto por J.W. Hilf, aplicado a los materiales encontrados en la zona de trabajo. También se hace una relación densidad – resistencia y humedad – resistencia. Teniendo en cuenta que varios factores influyen en la cantidad de compactación alcanzada en la obra. Es bien conocido que la densidad seca máxima y la humedad óptima varían para cada tipo de suelo, sin embargo es menos considerado como el tipo de suelo afecta los resultados de campo en una manera diferente a la del ensayo de referencia debido a su influencia en el efecto de los métodos de preparación del suelo y la eficiencia de los equipos de computación en obra. El gran efecto del cambio en la humedad de compactación en los resultados de la densidad seca es también bien conocido. Los aditivos químicos como la cal o el cemento que se emplean para estabilizar el suelo por modificación de sus propiedades también cambiaran las características de compactación. Y varios factores más que afectan el proceso de compactación como son: proceso de preparación, uniformidad de los procedimientos, influencias del medio ambiente, tipos de compactadores, energía de compactación, espesor de capas, rango de compactación, es decir la construcción de terraplenes en el aeropuerto del café enfrenta retos para la ingeniería geotécnica, por la características particulares de los materiales volcánicos en ambiente tropical. SANCHEZ GARZON, Andrés; Evaluación del método de Hilf [6].

### 3. ANTECEDENTES CONTEXTO INTERNACIONAL

La utilización de la cal para la estabilización de los suelos es conocida ya por los romanos (construcción de vías), por los tibetanos (construcción de pirámides) y por los chinos (la Gran Muralla). En el mundo occidental este tipo de aplicación de la cal se ha difundido - partiendo en primer lugar de los EE.UU. - de forma creciente solo a partir de la segunda mitad del siglo XX.

La cal viva y el hidrato de cal se utilizan principalmente con los siguientes objetivos, Para mejorar suelos existentes y ser utilizados como vías de transporte y obras temporales, compactar caminos rurales y forestales, compactar las estructuras de carreteras con elevada incidencia de tráfico y construir pistas de aterrizaje en aeropuertos, para aparcamientos y líneas ferroviarias. La utilización de productos cálcicos en suelos arcillosos trae consigo una mejora de las características mecánicas de los mismos, como por ejemplo, su contenido de agua, composición granulométrica, plasticidad, densidad y resistencia a las heladas, produciéndose fundamentalmente las siguientes reacciones. La reacción de apagado - al utilizar cal viva - lleva a la extracción del agua y con ello al secado la sustitución de los iones de sodio, potasio e hidrógeno en los minerales arcillosos por iones de calcio reduce la plasticidad y aumenta la manejabilidad y las propiedades de compactación del suelo.

En los EE.UU. se emplea fundamentalmente cal hidratada para estabilizar los suelos, en Europa se utiliza sobre todo cal viva. En suelos con alto contenido de agua es recomendable utilizar cal de grano fino, pues debido a la reacción de apagado el secado se produce más rápidamente. Razones económicas, como una mayor eficacia del óxido de calcio por unidad de peso, un precio más bajo y una menor necesidad de espacio de transporte hablan a favor del empleo de cal calcinada, en tanto que su efecto cáustico requiere de medidas especiales de protección en su manipulación. La adición de hidrato de cal al asfalto en la construcción de carreteras, en aeropuertos y otras áreas de tráfico aumenta la estabilidad de la capa asfáltica y reduce su sensibilidad al agua (hinchamiento), así como la pérdida de resistencia a la tracción hasta en un 50%. Además se mejora la adherencia del aglomerante a la piedra y la facilidad de mezcla. Puede verse hoy que las técnicas de compactación lograron ganar en un lapso Relativamente breve la confianza de los ingenieros y constructores de obras para el transporte, a un grado tal, que hoy su uso puede considerarse prácticamente universal en obras de infraestructura vial. De hecho, los criterios evolucionaron definitivamente en sentido opuesto al inicial y en la actualidad la idea es que la compactación es aceptada

indiscriminadamente, considerándose que cuanto más se compacte los suelos, mejores resultados han de obtenerse. Este criterio aplicado puede conducir fácilmente a todos los riesgos de sobre compactación de suelos como puede ser fracturarlas partículas de suelo, perdiendo este características de resistencia, lo cual lo hacen menos favorable. La utilización efectiva de métodos de compactación como son la compactación estática por presión, La cual se logra utilizando una maquina pesada, cuyo peso comprime las partículas del suelo, sin necesidad de movimiento vibratorio. Compactación por vibración, la cual se logra aplicando al suelo vibraciones de alta frecuencia por ejemplo placa o rodillos vibratorios. Compactación por amasado, la cual se logra aplicando al suelo alto presiones distribuidas en áreas más pequeñas que los rodillos lisos. Ejemplo rodillo pata de cabra. (Maerz, burnig quality) [7].

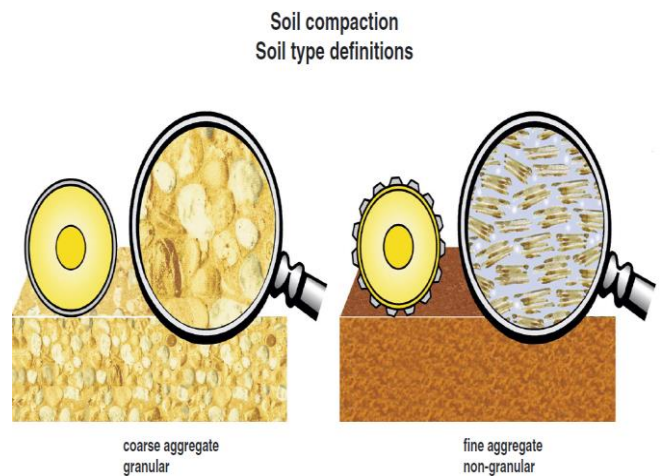


Figura No. 3. Compactación de suelos rodillo liso y tipo pata de cabra. (Germany, Bomag Americas inc 2000, kentville, road,kewanee).

Los siguientes estudios fueron elaborados por (BOMAG GERMANY, BOMAG AMERICAS INC 2000, KENTVILLE, ROAD,KEWANEE) [8].

Para determinar la producción horaria de un equipo de compactación, se debe tomar en cuenta los siguientes factores:

$$\text{Ancho compactado} = A = \text{mts. (Ancho del rodillo o tambor)}$$

$$\text{Velocidad de operación} = V = \text{Km/hora}$$

$$\text{Espesor de la capa} = C = \text{metros}$$

$$\text{Numero de pasadas para obtener la compactación especificada} = N$$



Factor de eficiencia=E

Rendimiento

Por 1 pasada=velocidad X ancho tambor X E=metros cuadrados / hora

Rendimiento

Por N pasadas= (velocidad X ancho tambor X E)/ N

La forma de mejorar los elementos mecánicos en un suelo es la compactación. Los efectos más importantes que produce una buena compactación en un suelo son Resistencia mecánica, minimización de asentamientos y reducción de la permeabilidad.

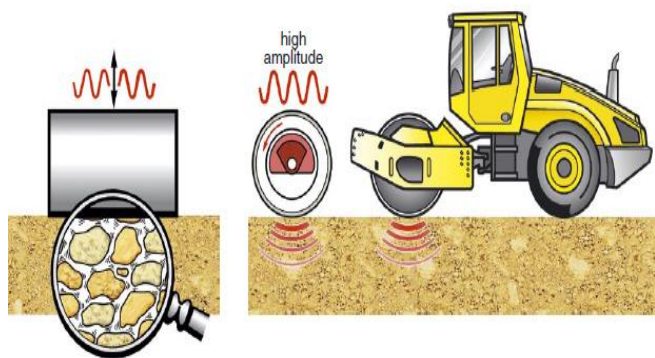


Figura No. 4. Energía de compactación por vibración. (Germany, Bomag Americas inc 2000, kentville, road,kewanee).

La energía específica de compactación (energía que se le entrega al suelo por unidad de volumen durante el proceso mecánico de que se trate). Contenido de humedad del suelo. Cantidad y espesor de las capas del terraplén. Número de pasadas del equipo de compactación. Los métodos usados para la compactación dependen del tipo del suelo, los fricciones, como las arenas, se compactan eficientemente por métodos vibratorios (placas vibratorias), mientras que los suelos tipo arcillosos se compactan mejor por métodos estáticos (rodillo pata de cabra, rodillos neumáticos, rodillos lisos) Se define como grado de compactación (GC) de un suelo compactado a la relación, en porcentaje, entre la densidad seca alcanzada en obra y la densidad máxima seca obtenida en el laboratorio para el mismo suelo (ensayo Proctor estándar o modificado). GC (porcentaje)= (densidad seca del suelo IN SITU) / (densidad máxima seca del laboratorio) X 100. Entre los métodos para determinar la densidad seca en obra, son tres los más utilizados, por lo tanto

de un buen control depende que la compactación se lleve a cabo correctamente.

Una investigación de relevancia fue realizada en Chile para realizar el control de compactación en tranques de relave, determinando el grado de compactación y el espesor final de capa compactada y considerando la variabilidad que presenta in situ este tipo de materiales, una alternativa posible de emplear es el penetrómetro dinámico ligero PANDA (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté). Comparado con las herramientas habitualmente empleadas para el control de compactación (método cono de arena y densímetro nuclear), el penetrómetro PANDA presenta una serie de ventajas, tales como: rapidez en la ejecución del ensayo, fácil repetitividad, versatilidad del equipo, fiabilidad de los resultados obtenidos, sustentabilidad ambiental, bajos costos y facilidad de transporte lo que permite analizar lugares de difícil acceso como los taludes de tranques de relaves. (Espinace et al. 2007)

Si bien actualmente los avances de la práctica ingenieril y el marco normativo chileno han permitido el desarrollo de proyectos de tranques de relaves de alturas del orden de 250 (m), existe aún una serie de vacíos legales específicamente en relación al control de compactación que debe ser realizado durante la etapa operacional de estos depósitos. En efecto, actualmente solo se controla el grado de compactación a nivel superficial, considerando un número reducido de puntos definidos a "juicio ingenieril", sin considerar dos aspectos fundamentales: el espesor de capa depositado y la variabilidad que presentan las arenas de relaves. Ello podría conducir a generar zonas de débil resistencia al interior del muro resistente de un tranque de relaves y por consecuencia un inadecuado comportamiento mecánico conducente a fallas o colapsos estructurales. Benz. M.A. Cancino, P. (2005) [9].

#### 4. CONCLUSIONES

El factor de mayor importancia para dar una compactación óptima en un suelo, es el contenido de humedad del material. Los esfuerzos de compactación pueden transmitirse al suelo por la combinación de uno o más de los siguientes efectos, Presión estática, impacto, vibración y amasamiento. El compactador que deberá usarse dependerá básicamente del tipo de suelo que se quiera compactar. La selección de compactadores deberá hacerse con mucho cuidado y tratando de hacer intervenir las variables ya que de esto dependerá la efectividad en el proceso.

La eficacia de la compactación que se puede lograr en obra depende, entre otros factores de, la naturaleza del suelo a compactar. La elección adecuada del equipo, tipo, peso, presión de inflado de neumáticos, área de contacto y frecuencia de vibración, siendo estos factores muy importantes que inciden directamente en el momento de compactar un suelo, afectando directamente la relación costo beneficio de un proyecto a ejecutar.

La compactación estática fue por muchos años la más utilizada en Colombia. Fue adoptada, debido a su facilidad y practicidad en campo u obra, con la llegada de equipos de rodillo vibratorio los cuales permitieron desarrollar proyectos en menores tiempos, mejorando por mucho la relación costo beneficio, es hoy en día el método más utilizado y confiable de la utilización de la energía como método de compactación de suelos.

Los métodos de utilización de la energía de compactación hoy en día no son los más confiables puesto que no se ha desarrollado todavía una metodología de auténtica utilidad, para que se realice un procedimiento con altos estándares de confiabilidad, para la medición en campo, de la energía de compactación

Los avances en la tecnología permitieron que se retomaran las investigaciones que hacia la década de los ochenta habían sido solo ideas y pruebas infructuosas para el desarrollo de la compactación inteligente un método eficaz y confiable de transferir la energía de compactación necesaria para mejorar la capacidad de un material de resistir la deformación bajo una carga, la compactación inteligente puede proporcionar una cobertura 1 a 1 y mediciones de control de calidad. Esta opción les brinda a los operadores en la obra respuestas en tiempo real sobre los niveles y la cobertura de compactación, lo cual posibilita la realización de ajustes en el proceso de aplicación de la energía de compactación.

Los diversos métodos de prueba de evaluación de calidad para medir los materiales compactados, según las especificaciones y normas de construcción del país. Incluyen pruebas desde densidad nuclear y método del cono de arena hasta rodamiento de prueba y verificación visual. Cada método de medida tiene elementos que hacen que su uso resulte incómodo. Además de sus altos costos, demanda de tiempo, transporte y almacenamiento, factores que hacen que los indicadores de densidad con dichos aparatos sean poco prácticos, lo cual volvería obsoletas las pruebas manuales costosas y que llevan tiempo. Con la implementación de equipos de compactación inteligente no se requerirá más de dichos aparatos.

Las investigaciones y antecedentes en el mundo nos dejan como evidencia que no es conveniente realizar mejoramiento de la estructura y característica de un suelo con los diferentes métodos utilizados como son la utilización de químicos, puesto que son efectivos para mejorar la resistencia de un suelo, pero no son amigables con el medio ambiente, provocando una problemática mayor en la afectación ambiental que en la solución inicial.

## REFERENCIAS

1. Ingeniería del terreno; Carlos Lopez Jimeno; Graficas Arias Montejó S.A Mostoles (Madrid)
2. Cox L, Walker A, Welch SJ (1996) Evidence for the accelerated degradation of isoproturon in soils. *Pestic Sci* 48:253–260 De´fossez P, Richard G, Boizard H, O’Sullivan
3. Soil enzyme activities as integrative indicators of soilhealth. In: Pankhurst CE, Doube BM, Gupta VVSR (eds) *Biological indicators of soil health*. CAB international, Wallingford, Plant and Soil 189: 91–96, 1997. 9 1997 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
4. LARA COBA, Darina; HERRERA SUAREZ, Miguel e IGLESIAS CORONEL, Ciro E. Sensoramiento continuo de la compactación del suelo: revisión y análisis. *Rev Cie Téc Agr* [online]. 2011, vol.20, n.3 [citado 2015-04-27], pp. 35-40.
5. JAKAB,G.; NÉMETH, T.; CSEPINSZKY, B., MADARÁSZ, B., SZALAI, Z. &
6. SANCHEZ GARZON, Andrés; Evaluación del método de hilf para el control de compactación de mezclas con suelos volcánicos del aeropuerto del café en Palestina; caldas. Trabajo de grado especialización en vías. Universidad nacional de Manizales.
7. Artículo digital Maerz, burnig quality application soli (acceso 13 de enero del 2015)
8. BOMAG GERMANY, BOMAG AMERICAS INC 2000, KENTVILLE, ROAD, KEWANEE
9. Benz. M.A. Cancino, P. (2005). "Control de la Calidad de Compactación y Estimación del Angulo de Fricción Interna de las Arenas de Relave con el Penetrómetro Ligero PANDA". Tesis de título. Ingeniería en Construcción. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Chile, 2005.

10. MF (2003) Modeling change in soil compaction due to agricultural traffic as a function of soil water content. *Geoderma*.
11. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, B11204, doi:10.1029/2010JB007697, 2010
12. The influence of forest site on rate and extent of soil compaction ... Williamson, J R; Neilsen, W A Canadian Journal of Forest Research; Aug 2000; 30, 8; ProQuest
13. *Plant and Soil* 258: 293–306, 2004. © 2004 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
14. Artículo compactación inteligente una tecnología en desarrollo (acceso 13 de enero del 2015)
15. Alletto L, Coquet Y, Benoit P, Bergheaud V (2006) Effects of temperature and water content on degradation of isotopuron in three soil profiles. *Chemosphere*.
16. Brajas M. Das; California State University; Sacramento; Thomson Learning
17. Castro, C.F., Sousa, L.C., Antonio, C.A.C. and César de Sa, J. (2001), ‘‘An efficient algorithm to estimate
18. Alfonso Rico Rodríguez; Hermilo del Castillo Mejía; ‘‘COMPACTACIÓN DE SUELOS EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE’’ ISSN 0188-7114; Documento Técnico ;No. 7; Sanfandila, Qro, 1992
19. Rico Rodrigo Alfonso ‘‘la ingeniería en las vías terrestres: carreteras ferrocarriles y aeropistas’’ Mexico; Limusa 2005
20. Métodos principales de compactación Revista Digital de Ingeniería, Arquitectura, Ciencia y Tecnología. (acceso 13 de Enero 2015)
21. <http://ingenieriareal.com/wpcontent/uploads/2014/12/Ingenier%C3%ADa-Real-N.png>
22. AEMA, CE, (2012): Documento de trabajo de los servicios de la Comisión.
23. Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo. Bruselas, 15.5.2012, SWD (2012) 101 final/2.
24. <http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/guidelines/ES%20-%20Sealing%20Guidelines.pdf>
25. <http://lacionamerica.cat.com/cda/components>fullarticle> hydrology and erosion at Balaton Uplands, Hungary.
26. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. KERTÉSZ, A. (2013): The influence of short term soil sealing and crusting on optimal preform die shape parameters in forging’’, *Engineering Computations*, Vol. 18,