



Análisis Sistemático de Literatura Acerca de la Tecnología de Compactación Inteligente.

Daniela Cristina Lozano Londoño

*Facultad De Ingeniería Civil. Universidad Cooperativa De Colombia
Villavicencio, Colombia*

daniela.lozanol@campusucc.edu.co

Abstract -.The purpose of this article is to analyze the intelligent compaction technology that is being used in countries with developed infrastructure and to identify the application alternatives in Colombia, for this an extensive literary analysis about intelligent compaction is carried out, which aims to provide a Higher quality road or embankment by implementing a reliable quality and interactive assurance system from the start of construction.

KEY WORDS: compaction, highway, embankment.

RESUMEN

El presente artículo tiene como propósito analizar la tecnología de compactación inteligente que se está siendo utilizada en países de infraestructura desarrollada e identificar las alternativas de aplicación en Colombia, para ello se realiza un extenso análisis literario acerca de la compactación inteligente la cual tiene como objetivo proporcionar una Carretera o terraplén de mayor calidad mediante la implementación de un Sistema de garantía interactivo y de calidad confiable desde el inicio de la construcción.

PALABRAS CLAVES: Compactación, carreteras, terraplén.

I. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, los materiales de relleno de tierra y rocas se compactan con rodillos estáticos o vibratorios. La compactación de una determinada zona se realiza mediante tiras paralelas (borde a borde o con alguna superposición) cubriendo cada tira con un número fijo de pasadas. La mayoría de los rodillos son rodillos vibrantes; su frecuencia y amplitud de vibración se mantienen constantes y el operador elige la velocidad del rodillo.

Un cierto número de pasadas y una velocidad constante del rodillo, la frecuencia de vibración y la amplitud no conducen necesariamente a un resultado de compactación homogénea en una capa debido a la variación en las propiedades del material, el contenido de agua de la capa que se compacta y la rigidez de la capa subyacente. Un número constante de pasadas y parámetros de rodillo constantes a menudo dejarán una cierta parte del área insuficientemente compactada, otra parte sobrecompactada y el resto suficientemente compactada.

Sin embargo, para la construcción de carreteras y terraplenes, en algunos países y durante los últimos 8 años, se ha utilizado un nuevo método de compactación llamado compactación inteligente. Este nuevo método tiene como objetivo proporcionar una carretera o terraplén de mayor calidad mediante la implementación de un sistema de garantía interactivo y de calidad confiable desde el inicio de la construcción. En el siguiente trabajo investigativo se describe la compactación inteligente, sus características, ventajas, aplicaciones y equipos.

La metodología que sigue la siguiente presente investigación es documental o bibliográfica con enfoque cualitativo.

II. OBJETIVOS

A. *Objetivo General:*

Realizar un análisis sistemático de literatura acerca de la tecnología de compactación inteligente.

B. *Objetivos específicos:*

Exponer las bases teóricas del Sistema de compactación inteligente que se implementa actualmente.

Caracterizar los diferentes equipos disponibles en el mercado para el desarrollo de la tecnología de compactación inteligente.

Analizar Comparativamente el Sistema de compactación inteligente con el Sistema de compactación tradicional

III. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se enfocará en analizar la tecnología de compactación Inteligente, tomando como referencia países con infraestructuras desarrolladas como Estados Unidos donde dicha tecnología ya es implementada.

La investigación surge debido tanto a las debilidades de las técnicas de compactación actuales con rodillos estáticos o vibratorios que impiden una compactación suficiente, como a los cambios mejorados que han traído los avances tecnológicos y que se han puesto a disposición de las ingenierías para facilitar el trabajo y garantizar su efectividad. En la investigación contempla una recopilación bibliográfica acerca de la tecnología de compactación inteligente, basada en la descripción de los diferentes sistemas disponibles según el fabricante de equipo de compactación, y el análisis teórico de la adquisición e implementación de la tecnología y las partes que componen el sistema integrado de compactación inteligente (termómetros, acelerómetros, GPS y pantallas de visualización). Versus los beneficios de trabajo y uniformidad en la compactación.

V. COMPACTACIÓN DE SUELOS

De este modo, esta investigación provee información que permite analizar las diferencias existentes entre el método de compactación tradicional y método de computación inteligente proveyendo información relevante y análisis de su efectividad, lo que podría generar cambios significativos en la ingeniería civil o enfatizar la importancia del uso continuo de esta tecnología.

IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día es lamentable el grado de desinterés en las obras viales que son parte primordial y prestan un servicio a la comunidad, la red vial del país, actualmente presenta un deterioro notorio que impide cumplir a cabalidad con su función de transportar bienes y personas de forma eficiente segura.

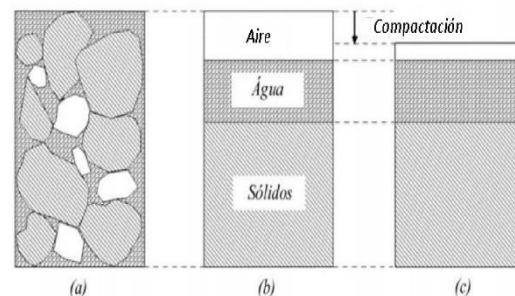
Esto evidencia no solo la falta de recursos si no la falta de compromiso de las entidades competentes y de los contratistas, los cuales, en su afán de aumentar beneficios propios, dejan de lado la calidad con las cuales deben entregar sus obras civiles.

Actualmente la planeación de proyectos tiene como pilar los costos; los cuales debido a los malos procesos de licitación tiene como consecuencia la mala ejecución de la obra sin mencionar la baja calidad de los materiales con la que realizan las carreteras y demás obras.

Es importante que las personas que cuentan con conocimiento requerido, insistan en la necesidad de mejorar los procedimientos y normativas para que la durabilidad que es en este caso el fundamento de esta investigación.

Se entiende por compactación una acción mecánica mediante la cual se impone al suelo una reducción de su índice de huecos. Si bien se trata de un fenómeno similar al de la densificación, ya que ambos se manifiestan en la compresibilidad de los suelos, en la densificación la reducción de vacíos se obtiene por la expulsión de agua intersticial, en un proceso natural o artificial, que ocurre con el tiempo, y que puede durar cientos de años; en la compactación esta reducción se produce, en general, expulsando el aire de los poros, en un proceso artificial de corta duración. Como se ilustra en la Figura 1a, el suelo está formado por partículas sólidas y huecos llenos de aire y agua. La Figura 1b muestra las porciones de sólidos, agua y aire antes de la compactación y la Figura 1c aclara que después de aplicar el esfuerzo de compactación, hay una reducción solo en la fracción de aire.

Ilustración 1. Principios de compactación de suelos



Fuente: Elaboración propia basado y modificado de BARDET, 1997

1. Objetivo de la compactación

La compactación tiene como objetivo transformar el suelo natural en un material más denso, es decir, aumentar el peso específico aparente. Como consecuencia, hay mejoras sustanciales en las propiedades de ingeniería, tales como: aumento de la resistencia al corte, reducción de la

compresibilidad y aumento de la resistencia a la erosión.

Varias son las obras civiles en las que se utilizan suelos compactados. Entre otras aplicaciones se mencionan:

- Rellenos sanitarios compactados en la construcción de presas de tierra, carreteras o en la implementación de subdivisiones;
- El suelo de apoyo para cimentaciones directas;
- Rellenos en muros de contención;
- Relleno de zanjas excavadas al aire libre y
- las laderas de las laderas naturales.

2. Principios de la técnica de compactación

La técnica de compactación se le atribuye al ingeniero norteamericano Ralph Proctor, quien, a principios de la década de 1930, publicó sus observaciones sobre la compactación de rellenos sanitarios, mostrando que al aplicar una cierta energía de compactación (un cierto número de pasos de un determinado equipo en el campo o un cierto número de golpes de una cavidad en el suelo contenido en un molde), el peso seco aparente es función de la humedad en la que se encuentra el suelo. Según PINTO (2000), de los trabajos de Proctor surgió el Test de Compactación, universalmente estandarizado (con pequeñas variaciones), más conocido como el Test de Proctor. En aras de la verdad histórica, se cita que Porter, del Departamento de Carreteras del Estado de California, el mismo que creó el ensayo CBR (California Bearing Ratio), ampliamente utilizado en pavimentación, ya en 1929 empleó un ensayo muy similar, que no tienen, sin embargo, la misma difusión en el entorno técnico que el trabajo de Proctor.

En sus estudios iniciales, Proctor observó que al compactar un suelo con muy baja humedad, la fricción entre las partículas es muy alta y no se logra una reducción significativa de los vacíos. Para mayor humedad, cercana al contenido óptimo, el agua provoca un cierto efecto lubricante entre las partículas sólidas del suelo, haciendo que se deslicen entre sí, acomodándose en una disposición más compacta. En la compactación, las cantidades de partículas y agua permanecen constantes; el aumento de la densidad

aparente seca corresponde a la eliminación de aire de los huecos. La salida del aire se facilita porque, cuando la humedad no es muy alta, el aire se presenta en forma de conductos intercomunicados. La reducción de la fricción por el agua y las canalículas permite un mayor peso seco aparente cuando el contenido de humedad es mayor. Sin embargo, después de un cierto contenido de humedad, la compactación ya no puede expulsar aire de los huecos, ya que el grado de saturación ya es alto y el aire está ocluido (rodeado de agua).

La prueba de compactación desarrollada por Proctor fue estandarizada por la asociación de departamentos de carreteras estadounidenses, AASHO (Asociación Estadounidense de Oficiales de Carreteras Estatales) y se conoce como Prueba Normal de Proctor o como AASHO Standart. Actualmente, esta prueba está estandarizada por NBR 7182/86 "Solo - Prueba de compactación".

Los ensayos de compactación se utilizan: (1) en el control de la compactación de terraplenes de presas, de capas constitutivas de pavimentos, del suelo utilizado en la estructura masiva de relleno y contención, del suelo utilizado en el relleno de cimentaciones y tuberías enterradas; y (2) en la determinación de los parámetros de compactación del suelo, en la fase de diseño de trabajos de tierra, con el fin no solo de conocerlos, sino también de utilizarlos para la realización de ensayos especiales (permeabilidad, densificación, cizallamiento directo y triaxial).

3. Evolución de las teorías de compactación

Varios investigadores (Proctor, 1933; Hogentogler, 1936; Hilf, 1956; Lambe, 1958; y Olson, 1963) explicaron la forma de

la curva de compactación del suelo, basándose en lo que les parecía lógico y en el estado de conocimiento en ese momento. El proceso que da lugar a la forma de la curva de compactación es muy complejo e involucra varias variables, como presión capilar,

presión en fase gaseosa, presión en fase fluida, permeabilidad y tensión efectiva.

El conocimiento del tema en la década del treinta llevó a PROCTOR (1933) a admitir que la compactación de un suelo, con bajo contenido de humedad, genera una gran tensión capilar y crea fuerzas de fricción que se oponen a las fuerzas de compactación, dando como resultado un suelo de baja densidad y pequeña plasticidad. El aumento del contenido de humedad conduce a una reordenación de las partículas, debido a una disminución de la tensión capilar, lo que resulta en un aumento de la densidad y plasticidad del suelo; este efecto continúa hasta que se alcanza el contenido de humedad óptimo y la densidad seca máxima para la energía utilizada en la prueba, dando como resultado la rama ascendente de la curva. Las condiciones del suelo, en el pico de la curva, son de suelo insaturado, lo que dificulta la expulsión del aire existente en sus huecos, por la misma energía utilizada en la prueba. Para un contenido de humedad superior al óptimo (rama húmeda), las fuerzas capilares disminuyen y las partículas se alejan dando como resultado suelos menos densos y más plásticos, representados por la rama descendente de la curva de compactación.

VI. TEORÍAS DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE

La tecnología IC, también conocida como Control de compactación continua (CCC), se inició en Europa para la compactación del suelo en la década de 1970 y se ha utilizado desde entonces (Mooney, 2010). Ahora, un número creciente de rodillos IC también se utilizan en la compactación de asfalto. El Dr. Heinz Thurner realizó los estudios de campo iniciales sobre medición integrada con rodillos en 1974 con un rodillo vibratorio Dynapac equipado con un acelerómetro. Los resultados de la prueba revelaron que la relación entre la amplitud del primer armónico y la amplitud de la frecuencia de excitación en el dominio de la frecuencia podría correlacionarse con el grado de compactación y la rigidez del suelo. En 1978, el Dr. Thurner y su compañero Åke Sandström desarrollaron el Compactometer y el valor del

medidor de compactación (CMV) (Thurner & Sandstöm, 2000) Dynapac fue la primera compañía en ofrecer el Compactometer basado en CMV en 1980, seguido por muchos otros fabricantes de rodillos (por ejemplo, Ammann, Caterpillar e Ingersoll Rand). Bomag introdujo el valor Omega para proporcionar una medida continua de energía de compactación y sirvió como la única alternativa al CMV durante ese tiempo. El valor Omega fue reemplazado por un módulo de vibración Evib más tarde para proporcionar una medida de la rigidez dinámica del suelo (Qi1, y otros, 2019)

Ammann introdujo un parámetro similar de rigidez del suelo k_s en 1999 (Kaufmann & Anderegg, 2004). En 2004, Sakai introdujo el valor de control de compactación (CCV) y utilizó el contenido armónico de la vibración medida del tambor para estimar el grado de compactación, que era similar al CMV (Scherocman, Rakowski, & Uchiyama, 2007)

El término de IC ha evolucionado aún más en los últimos años al introducir la excitación excéntrica servocontrolada. El propósito de esto es mejorar el rendimiento y la compactación del rodillo ajustando la amplitud y / o frecuencia de la fuerza vibratoria automáticamente. Sin embargo, el efecto de esta tecnología no está bien cuantificado.

1. Sistemas de medición integrados con rodillos.

En la tecnología IC, se obtienen varias mediciones durante el proceso de compactación, incluida la posición del rodillo GPS, la velocidad, el número de pasadas del rodillo, la temperatura de la superficie y los valores de medición del rodillo (MV). Se puede obtener una evaluación detallada sobre el nivel de compactación y la uniformidad en función de los datos recopilados. Los principales fabricantes de equipos de CI incorporan varios valores de medición de rodillos (MV) que dependen del equipo para reflejar el estado de compactación de los materiales subyacentes. La Tabla 1.1 resume

algunos MV comunes de los principales fabricantes de equipos.

Como se muestra en la Tabla 1.1, diferentes proveedores usan diferentes tipos de ICMV con el mismo propósito de evaluar el nivel de compactación. Estas mediciones se basan en análisis de frecuencia de vibración o modelado mecánico. Un rodillo IC generalmente tiene un acelerómetro montado en su tambor de rodillos, lo que permite que el rodillo IC registre los datos de interacción máquina-tierra y simultáneamente calcule el valor ICMV como un índice relacionado con la rigidez del material. En esta investigación, el valor del medidor de compactación basado en vibración (CMV) se adoptó como el valor de medición del rodillo principal. Desarrollado por Geodynamik, CMV es un parámetro de compactación adimensional que depende de las dimensiones del rodillo (es decir, el diámetro y el peso del tambor) y los parámetros de operación del rodillo (por ejemplo, frecuencia, amplitud y velocidad) y se determina usando la respuesta dinámica del rodillo (10). Dado que el tambor de un rodillo vibratorio somete el suelo o el pavimento a golpes periódicos, que es similar a una prueba de carga dinámica de placa, un intento razonable es utilizar los golpes del tambor cilíndrico como prueba de carga de suelo o pavimento. Después de evaluar esta idea en numerosas

Tabla 1. Medición de rodillos o valores de la máquina, después (11; 12)

| Fabricante | Valor de la máquina | Nombre | Descripción / Notas |
|---|---------------------|--|--|
| <u>Ammann</u> , <u>Case</u> | ks | Rigidez | Fuerza de contacto suelo-tambor / desplazamiento vertical del tambor |
| <u>Bomag</u> | <u>E.vib</u> | Módulo de vibración | Fuerza de contacto suelo-tambor / desplazamiento vertical del tambor [MN / m ²] |
| <u>Caterpillar</u> , <u>Dynapac</u> , <u>Hamn</u> , <u>Volvo</u> | CMV | Valor del medidor de compactación | En el dominio de la frecuencia, relación de amplitud de aceleración vertical del tambor a la frecuencia de vibración fundamental (operativa) y primer armónico. Depende de las dimensiones del rodillo (es decir, el diámetro y el peso del tambor) y los parámetros de operación del rodillo (por ejemplo, frecuencia, amplitud y velocidad). Sin dimensiones |
| | <u>MDP</u> | Potencia de accionamiento de la máquina, | Relación empírica entre las prestaciones mecánicas del rodillo con las propiedades del suelo compactado. Sin dimensiones |
| <u>Sakai</u> | CCV | Valor de control de compactación | En el dominio de la frecuencia, la relación algebraica de múltiples amplitudes de vibración vertical del tambor incluye frecuencia fundamental y múltiples armónicos |

Fuente: Elaboración propia basada en datos de Mallick (2015)

En las pruebas de campo (Sandström & Pettersson, 2014) , los investigadores encontraron que existía una relación significativa entre la relación entre la amplitud del primer armónico y la amplitud de la frecuencia fundamental del tambor de rodillos y el nivel de compactación alcanzado. También se descubrió que la amplitud de fuerza 'F' de los golpes es proporcional al primer armónico de la aceleración vertical del tambor, y el desplazamiento 's' durante el golpe se puede expresar por la amplitud de la integral doble de la fundamental componente de aceleración. Por lo tanto, un "módulo de deformación del cilindro"

La compactación inteligente (IC) (por sus siglas en inglés) se refiere a la compactación de materiales de carreteras, como suelos, bases de agregados o materiales de pavimento de asfalto, utilizando rodillos vibratorios modernos equipados con un sistema de medición integrado, un sistema de informes de computadora a bordo, mapeo basado en el sistema de posicionamiento global (GPS) y control de retroalimentación opcional. Los rodillos IC facilitan el monitoreo de compactación en tiempo real y los ajustes oportunos al proceso de compactación mediante la integración de sistemas de medición, documentación y control. Los rodillos IC también mantienen un registro continuo de gráficos codificados por colores, lo que permite al usuario ver los gráficos de la ubicación precisa del rodillo, el número de pasadas del rodillo y las mediciones de rigidez del material.

La compactación es uno de los procesos más importantes en la construcción de carreteras. Es necesario para lograr una alta calidad y uniformidad de los materiales del pavimento, lo que a su vez garantiza un rendimiento duradero. Los materiales del pavimento a menudo poseen densidades óptimas que aseguran un soporte, estabilidad y resistencia adecuados: lograr estas densidades de manera uniforme es clave y el IC ayuda a este proceso. Los procedimientos actuales que utilizan máquinas de compactación convencionales pueden dar como resultado densidades de material inadecuadas y / o

no uniformes, que pueden ser uno de los principales factores en la falla prematura del pavimento. IC ayuda a los usuarios a superar este problema al optimizar el proceso de compactación.

Sánchez (2016) define:

La compactación inteligente mide la rigidez (la capacidad de un material de resistir la deformación bajo una carga) en lugar de la densidad (la cantidad de peso por volumen). Esto refleja un alejamiento importante de las medidas de evaluación de calidad utilizadas tradicionalmente en Norteamérica. Existe una fuerte correlación entre la rigidez y la capacidad de carga, que es lo que persiguen los diseñadores de carreteras. (Sanchez, 2016)

La mayoría de los avances en el proceso de compactación se han limitado al equipo, pero durante los últimos treinta y cinco (35) años se han desarrollado herramientas adicionales a nivel internacional para ayudar al operador durante el proceso de compactación. Estas herramientas llevaron al inicio de la compactación inteligente (IC). El equipo de compactación inteligente mide y registra la calidad de la compactación durante el proceso de compactación. La fuerza del compactador cambia en tiempo real para aumentar la compactación donde sea necesario, mientras se evita la sobrecompactación. El equipo utiliza un sistema de posicionamiento global para crear un mapa que muestra la calidad de la compactación en toda la superficie de cada elevador. En 2005, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) desarrolló un plan estratégico para la introducción de la tecnología IC en los Estados Unidos con el propósito específico de mejorar la vida útil de los pavimentos. El rendimiento mejorado del pavimento reducirá la congestión de la zona de trabajo y aumentará la seguridad para el público que viaja (Aschenbrener, Brown, Tran, & Blankenship, 2017).

La tecnología consiste en adaptar un sistema integrado de compactación inteligente incorporado a un compactador vibratorio, con el propósito de registrar el módulo de rigidez del material junto con la trayectoria del equipo, en tiempo real, de modo que sea posible mostrar en una pantalla de visualización

un mapa de códigos de colores según la rigidez de la capa compactada, u otro del número de pasadas del compactador. De esta manera es posible asegurar una capacidad de soporte uniforme de cada capa compactada; facilita información del 100% del área trabajada, identifican áreas de pobre compactación, evita hacer conjetura con base de ensayos individuales y reduce el riesgo de sobrecompactar y triturar el material.

La compactación inteligente optimiza la eficiencia del proceso de trabajo, maximizando la productividad y minimizando los costos. La presente investigación pretende dar a conocer con más detalle la metodología para metodología para la implementación y adquisición, además de los beneficios de utilización.

Garantiza un comportamiento más homogéneo de los materiales que redundará en una mayor vida útil de la estructura de pavimento de la vía, y una menor inversión en reparaciones futuras.

2. Equipos disponibles en el mercado para el desarrollo de tecnología de compactación inteligente

Mapeo de temperatura proporciona al operador: ES un “mapa” de temperatura que muestra la trayectoria del compactador superpuesto con la última temperatura de superficie registrada.

Pantalla de calibración del sistema Density Direct: permite al usuario establecer la densidad objetivo del proyecto. Una vez calibrado por completo con datos específicos de la aplicación, el sistema Volvo Intelligent Compaction con Density Direct produce un cálculo de densidad con una precisión de 1,5% del muestreo de núcleos, lo que proporciona una lectura en tiempo real de los valores de densidad para más del 100% del tapete.



Fuente: Carreteras Pan-Americanas November 2015
No.1

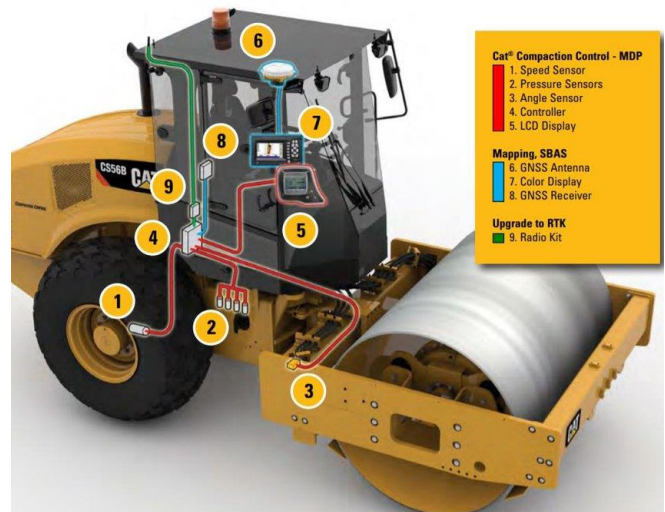
El operador puede utilizar los datos en tiempo real para realizar los ajustes necesarios mientras se pavimenta el asfalto. Esto está diseñado para reducir la ocurrencia de densidades inadecuadas que elevan los costos del proyecto y reducen el tiempo dedicado a tomar muestras de núcleos en un esfuerzo por mejorar la calidad. También está diseñado para lograr una mayor uniformidad que la que se ofrece a través de las pruebas de calibre nuclear.

La máquina guarda la información de calibración, lo que permite a los operadores asignar calibraciones a ciertos elementos del trabajo y alternar rápidamente entre calibraciones para cumplir con las demandas específicas del elemento del trabajo. Los datos recopilados del mapeo de paso, mapeo de temperatura y mapeo de densidad se almacenan en el disco duro interno de 14 GB del sistema IC durante aproximadamente siete meses de registro de datos. Se pueden realizar copias de seguridad de los datos en unidades USB en formato VEDA, el sistema Freeware promovido por la FHWA para sistemas IC. Con el GPS diferencial opcional, los datos recopilados de Volvo IC están vinculados a información de ubicación con una precisión de 0,5 pulgadas. Ambos paquetes Volvo IC cumplen con los requisitos estatales DOT y FHWA para especificaciones de compactación inteligente.

Machine Drive Power (MDP) de Caterpillar: está diseñado para medir la densidad del suelo en

condiciones más amplias con mayor precisión. Está diseñado para trabajar en todo tipo de suelos, incluidos los finos, granulares y cohesivos. MDP está diseñado para medir la energía necesaria para superar la resistencia a la rodadura de tal manera que sea una medida más tangible y directa de la rigidez del suelo. Una de las grandes utilidades de esta herramienta se da en un suelo muy suelto y elevado en el cual se requiere de mucha energía para mover el rodillo a través del mismo; a medida que la tierra se vuelve más compacta y el suelo más rígido, se necesita menos energía para mover la máquina.

Fuente: Caterpillar Machine Drive Power (MDP) system (Caterpillar 2013).



Un compactador tiene que estar funcionando para que un acelerómetro lea la rigidez del suelo, mientras que un sistema MDP puede colocarse sobre rodillos estáticos. El MDP se ha introducido en los compactadores de cuatro tambores de la serie 815 de Caterpillar. MDP funciona en tambores lisos, tambores de almohadilla y tambores lisos equipados con kits de carcasa de almohadilla. El sistema funciona con el sistema de vibración encendido o apagado para permitir a los operadores medir durante las pasadas de trabajo y apagar el sistema de vibración para las pasadas de prueba. Es escalable para cumplir con los requisitos. MDP está diseñado para medir más cerca de la profundidad que la máquina puede compactar y más cerca del grosor del

levantamiento. Sus mediciones están diseñadas para correlacionarse más fácilmente con dispositivos de medición portátiles, como pruebas de carga de placas; menos afectado por el efecto amortiguador de los suelos cohesivos; y no propenso a variaciones.

Compaction Meter Value (CMV): es un sistema de medición basado en acelerómetro para suelos granulares disponible en compactadores de suelo de tambor liso (modelos CS). El sistema funciona mientras el tambor vibra, midiendo entre 3 y 4 pies en el suelo para proporcionar al operador una imagen de lo que sucede debajo de la superficie. El CMV está diseñado para revelar a un operador capacitado la ubicación de anomalías ocultas, como objetos enterrados, rocas, bolas de arcilla y áreas de mala compactación, o indicar la necesidad de más humedad para ayudar a la compactación.



Fuente: RodillosWackerNeuson

Economizador BOMAG: desarrollado originalmente para placas compactadoras BOMAG, es una de las tecnologías más nuevas que amplía la línea de rodillos tándem. Ofrece un funcionamiento intuitivo con resultados de compactación en tiempo real que se pueden leer fácilmente en una pantalla LED en el panel de instrumentos. Una vez que se ha alcanzado la frecuencia de trabajo óptima del rodillo, las luces LED amarillas indican el nivel de rigidez del material. A medida que aumenta la compactación, se encienden más luces LED en Economizer. Cuando el número de luces amarillas deja de aumentar, se ha alcanzado el nivel máximo de compactación. Si las 10 luces amarillas están encendidas, una luz LED roja se enciende como un indicador para que el operador deje de rodar esa sección. Esto evita la sobrecompactación y la fractura del agregado, y la costosa remoción y reemplazo de material. Un beneficio adicional del Economizer es que permite al operador hacer pruebas de rodamiento del área para buscar y abordar áreas débiles. El economizador está diseñado para lograr un control de compactación de la superficie total. El valor, la operación simple y el costo relativamente bajo del Economizer están abriendo la capacidad de tener resultados de compactación en tiempo real a una gama más amplia de contratistas. Se puede utilizar para mejorar los resultados de la compactación en una amplia variedad de aplicaciones, desde calzadas y estacionamientos hasta carreteras y autopistas. Y el costo relativamente bajo.



Fuente: <https://www.yanceybros.com/wpcontent/uploads/2020/03/CMV1.pdf>

Wacker Neuson: ofrece una pantalla de compactación llamada Compatec. Es un dispositivo que se utiliza para dar al operador retroalimentación en vivo con respecto a la compactación relativa y está diseñado para ayudar al operador a evitar pases innecesarios. Compatec también protege la máquina al alertar al operador con luces LED intermitentes cuando la máquina está operando en una situación de sobrecompactación.



Fuente: <https://www.bomag.com/saes/tecnologias/inteligente/economizer/>

3. Análisis comparativo entre el sistema de compactación inteligente y el sistema de compactación tradicional

Para la realización de este punto fue necesario hacer una revisión bibliográfica de estudios de caso en los cuales los investigadores hicieron pruebas y a partir de ellas elaboración diagnósticos de efectividad. Peña (2018) analizó un tramo que requería la ejecución de mejoramientos de la subrasante a fin de evitar deformaciones en la estructura del pavimento. Su metodología consistió en identificación y posterior demarcación de zonas del tramo seleccionado en el que se evidenciaba deterioro del suelo y por ende su mejoramiento. Posteriormente se realizó una sobre excavación de 0,90 metros de altura o espesor por la longitud afectada y por el ancho de la calzada. La excavación se rellenaría en cuatro (4) capas, la primera de 0,30 metros de rajón y otras tres (3) capas de 0,20 metros de subbase (Peña, 2018).

Para un tramo de 110 metros utilizando el sistema de compactación tradicional Peña (2018) registro así el procedimiento:

Tabla 2. Actividad para lograr el grado de compactación mínimo requerido con el sistema de compactación tradicional

| ACTIVIDAD OBSERVACIÓN | TIEMPO (minutos) | OBSERVACIÓN |
|--|------------------|--|
| Primera pasada con el vibro compactador | 20 - 30 | Se pasa la máquina antes de humedecer. |
| Humectación | 10 - 15 | Pasa el carro tanque humedeciendo el suelo |
| Tiempo de humectación | 30 - 45 | Tiempo de espera para que el agua descienda y la capa tenga el mismo porcentaje de humedad en todo su espesor. |
| Primera compactación | 60 | Se pasa el <u>vibrocompactador</u> varias veces por el terreno |
| Revisión de la compactación | 10 - 15 | Se revisa que superficialmente se observó bien compactado, para llamar al encargado de tomar las densidades. |
| Llegada del laboratorista encargado del ensayo | 15 - 60 | Es el tiempo que transcurre mientras baja la persona a hacer el ensayo. |
| Toma de densidades | 20 - 40 | El tiempo que se tarda en hacer el ensayo de densidad y los respectivos cálculos |
| TOTAL | 165 - 265 | En caso de que se acepte la capa con la primera compactación. |

Actividad para lograr el grado de compactación mínimo requerido con el sistema de compactación inteligente

| ACTIVIDAD OBSERVACIÓN | TIEMPO (minutos) | OBSERVACIÓN |
|---|------------------|--|
| Primera pasada con el <u>vibrocompactador</u> | 20 | Se pasa la máquina antes de humedecer |
| Humectación | 10 - 15 | Pasa el carro tanque humedeciendo el suelo |
| Tiempo de humectación | 30 - 45 | Tiempo de espera para que el agua descienda y la capa tenga el mismo porcentaje de humedad en todo su espesor. |
| Compactación inteligente | 60 | El <u>vibrocompactador</u> pasa varias veces por el terreno y se va midiendo la rigidez en toda el área. Si alguna zona tiene menor grado de compactación se hacen más pasadas hasta que cumpla. |
| TOTAL | 120 - 140 | Sólo en el caso de que una zona no compacte debería levantarse esta área que ya está identificada y delimitada |

Adicional a ello, el autor anota que el sistema de compactación inteligente permite trabajar de manera consecutiva las tres capas en toda la longitud de 240 metros.

Los resultados comparativos se describen a continuación:

- La primera actividad muestra que la diferencia entre los sistemas de compactación tradicional e inteligente (suponiendo el mejor desnecesario posible) garantiza una reducción de 45 minutos utilizando el segundo sistema mencionado, aunado a ello se debe considerar que el sistema de compactación inteligente no se limita los resultados específicos por cada 400m² sino que permite un registro de toda el área compactada.

- Suponiendo un escenario no favorable la diferencia en tiempo entre ambos sistemas es de 125 minutos.
- En este punto se consideró los mismos tiempos de compactación entre el vibro compactador tradicional y el que tiene adaptado el sistema de compactación inteligente. Por su puesto el sistema de compactación inteligente requiere menos tiempos toda vez que se liberan que sean alcanzados en el parámetro de control requerido evitando sobre compactación.
- Exista una disminución significativa en lo relativo al porcentaje de tiempo ahorrado usando el sistema tecnológico de compactación inteligente en un tramo de 110 metros de la siguiente manera: con condiciones óptimas de 72.72% y en condiciones desfavorables 52.83%.
- Los resultados del uso de la tecnología de compactación inteligente no tienen dependencia a correlación con medidas subjetivas o de ensayos de laboratorio, puesto que sus registros se registran y verifican en tiempo real lo que elimina la oportunidad de que se presenten errores humanos.

VII. BENEFICIOS DE LA COMPACTACIÓN INTELIGENTE

1. Mejoramiento de la Densidad

En muchos países del mundo se han documentado exitosamente el potencial de la tecnología de compactación inteligente en el mejoramiento de las densidades in situ.

2. Productividad

La optimización de la productividad es de los principales logros de la tecnología de compactación inteligente, lo anterior debido a que alcanza la densidad óptima y deseada del terreno con un mínimo número de pasadas, haciendo la compactación un proceso mucho más eficiente.

3. Reducción en Costos de Mantenimiento

El incremento de las densidades se evidencia la prolongación de la vida de los pavimentos, y la reducción de costos de los mismos, el mejoramiento en términos de eficiencia de las operaciones de compactación se traduce en bajos costos para los contratistas

4. Áreas no Compactibles

Al conocer los valores de rigidez en tiempo real, permite evaluar las áreas en las cuales no se puede llevar a término la compactación del material adecuadamente.

5. A contratistas

La tecnología de compactación inteligente da acceso a los contratistas de obra, revisar toda la operación de compactación la cual tiene como resultado final un mayor trabajo y un producto de excelente calidad.

Optimiza recursos al tener mayor cobertura en el área de trabajo sin pasadas innecesarias.

VIII. COMPACTACIÓN INTELIGENTE EN COLOMBIA

la compactación inteligente en un concepto poco conocido en nuestro país. Actualmente solo tres empresas no solo conocen sobre compactación inteligente, sino que también la implementan en sus más recientes proyectos, solo con fines de control de calidad interno.

Según Moreno*, en Colombia es complejo implementar tecnologías nuevas en proyectos

estatales y más aún, tecnologías que no han sido estandarizadas ni reglamentadas por las entidades competentes.

Los beneficios de la compactación inteligente han sido identificados, no solo para los contratistas sino también para las entidades gubernamentales.

1. Costos de Implementación

Dado que los compactadores de suelos equipados con la tecnología de compactación inteligente requieren de instrumentación especial y sistemas de documentación y posicionamiento global, es evidente que se requiere una inversión mayor a la que se realiza al adquirir compactadores convencionales.

El costo de la implementación se estimó como parte de este estudio al realizar un sondeo comercial, en casa distribuidoras y comerciales en general (Hamm Ag, Bomag y Caterpillar). Se encontró que el precio del equipo nuevo varía de acuerdo al fabricante, sin embargo, este valor oscila entre los doscientos y doscientos ochenta millos de pesos colombianos (\$ 200.000.000 - \$ 280.000.00 m/cte.), el costo incluye valor del equipo, impuestos de importación, y transporte hasta Colombia, lo valores pueden variar debido a que las casas matrices de la mayoría de los fabricantes de compactadores se ubican en Europa.

Algunos fabricantes ofrecen dentro de su línea de productos un kit básico que permite equipar las maquinas, siempre y cuando correspondan al mismo fabricante.

El sondeo comercial realizado permitió estimar el valor de estos kits cuestan entre ochenta y noventa millones colombianos (\$ 80.000.000 - \$ 90.000.000 m/cte.) aproximadamente, dependiendo de la TRM del euro

IX. CONCLUSIONES

El trabajo de investigación permitió concluir que:

- Se describen de una manera detallada las bases teóricas del sistema de compactación inteligente.
- Se describen las características y beneficios de los equipos que actualmente se utilizan para el sistema de compactación inteligente.
- Existen un creciente interés y a su vez tecnológica enfatizada en la implementación de compactación inteligente. La diversidad de herramientas expuestas es muestra de que posible cambio que se llevara a cabo en su totalidad en lo que respecta al método y técnicas de compactación.
- La tecnológica de compactación inteligente respecto de la convencional utiliza un menor tiempo.
- La tecnológica de compactación inteligente mide parámetros de rigidez en tiempo real en la totalidad del área compactada.
- La medición de los parámetros de rigidez en tiempo real usada por tecnológica de compactación inteligente evita los diagnósticos indirectos que se tienen que verificar con ensayos de laboratorio lo que implica menos tiempo de trabajo y la toma de decisiones inmediatas en caso de algún inconveniente.
- La tecnológica de compactación inteligente generar capas homogéneas y de mayor rigidez que el sistema de compactación convencional.
- Los atributos anteriormente mencionados como resultado del uso de sistema de compactación inteligente evitan sobrecostos por incremento de cantidades de obra en el momento de pavimentar.

- Los atributos anteriormente mencionados como resultado del uso de sistema de compactación inteligente tienen un alto valor en lo relativo a la repercusión de fallas asociados a la construcción durante la etapa de garantía.
- En Colombia son notorios los cambios y actualizaciones de como se debe construir la infraestructura vial. La tecnología de compactación inteligente no solo proporciona mejores calidades en obra, sino también en costos y durabilidad.

X. REFERENCIAS

Aschenbrenner, T., Brown, R., Tran, N., & Blankenship, P. (2017). *DEMONSTRATION PROJECT FOR ENHANCED DURABILITY OF ASPHALT PAVEMENTS THROUGH INCREASED INPLACE PAVEMENT DENSITY*. Obtenido de National Center for Asphalt Technology: <https://eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep17-05.pdf>

Kaufmann, K., & Anderegg, R. (2004). *Intelligent Compaction with Vibratory Rollers: Feedback Control Systems in Automatic Compaction and Compaction Control*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/239438860_I

Intelligent Compaction with Vibratory Rollers: Feedback Control Systems in Automatic Compaction and Compaction Control

Mooney, M. (2010). *Intelligent Soil Compaction Systems*. Obtenido de [books.google.com.co: https://books.google.com.co/books?hl=en&lr=&id=PXq_okGGp9UC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Mooney,+M.+A.+Intelligent+soil+compaction+systems.+Transportation+Research+Board,+2010.&ots=RBCW9n-lRg&sig=w7OKkbnZvbfriIhQbOu8j44#v=onepage&q=Mooney%20M.%20A.%20Intellige](https://books.google.com.co/books?hl=en&lr=&id=PXq_okGGp9UC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Mooney,+M.+A.+Intelligent+soil+compaction+systems.+Transportation+Research+Board,+2010.&ots=RBCW9n-lRg&sig=w7OKkbnZvbfriIhQbOu8j44#v=onepage&q=Mooney%20M.%20A.%20Intellige)

Peña, N. (2018). *Análisis del sistema de compactación inteligente*. Obtenido de Universidad Santo Tomás : <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13789/2018penanadia.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Qi, Y., Huihuang, J., Mingxian, G., Weigu, X., Xiaoxia, Y., & Longliang, W. (2019). *Discussion on Detection Method of Continuous Compaction Control Technology in Filling Engineering*. Obtenido de American Journal of Civil Engineering: <http://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648.j.ajce.20190704.15.pdf>

Sanchez, N. L. (2016). *Compactación Inteligente: Una Tecnología En Desarrollo De La Construcción De Carreteras*. Obtenido de Civilgeeks: <https://civilgeeks.com/2013/11/14/compactacion-inteligente-una-tecnologia-en-desarrollo-de-la-construccion-de-carreteras/>

Sandström, Å., & Pettersson, C. (2014). *Intelligent Systems for QA/QC in soil compaction*. Obtenido de

GEODYNAMIK

HT

AB:

https://www.intelligentconstruction.com/downloads/PapersReports/GeoDynamik_Sandstrom_Intelligent%20Systems%20for%20QAQC%20in%20Soil%20Compaction_2004.pdf

Scherocman, J., Rakowski, S., & Uchiyama, K. (2007). *Intelligent Compaction, Does It Exist?* . Obtenido de semantic scholar:

https://pdfs.semanticscholar.org/4671/65ce9342d4dfe12417edad42d597d1ba0251.pdf?_ga=2.137928432.1953472539.1572022237-727759353.1572022237

Turner, H., & Sandstóm, Å. (2000). *Continuous Compaction Control, CCC*. Obtenido de European Workshop:

https://www.intelligentconstruction.com/downloads/PapersReports/GeoDynamik_Thurner_CCC_2000.pdf