

ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE

NADIA LILIANA PEÑA RINCÓN

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2018**

ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE

NADIA LILIANA PEÑA RINCÓN

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
JUAN MIGUEL SÁNCHEZ DURÁN
Ingeniero Civil, MSc**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2018**

Nota de aceptación

Director de Investigación
Ing. Juan Miguel Sánchez Durán

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., 16 de agosto de 2018

CONTENIDO

RESUMEN	9
GLOSARIO	10
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 DEFINICIONES BÁSICAS Y TERMINOLOGÍA DE SUELOS	17
2.1.1 Unidades	17
2.1.2 Gravedad específica	18
2.1.3 Relación de vacíos y porosidad.....	18
2.1.4 Grado de saturación	19
2.1.5 Pesos unitarios	19
2.1.6 Contenido de humedad	20
2.2 FUNDAMENTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS	20
2.2.1 Factores que afectan la compactación	21
2.2.2 Pruebas de compactación de laboratorio	21
2.2.3 Resultados del ensayo de compactación	22
2.2.4 Efectos del contenido de agua en la compactación	23
2.2.5 Efectos de incrementar el esfuerzo de compactación	24
2.2.6 Efectos del tipo de suelo	24
2.2.7 Especificaciones de campo	24
3. FUNDAMENTOS DE LA COMPACTACIÓN INTELIGENTE	26
3.1 DEFINICIÓN	26
3.2 MECANISMO DE TRABAJO	26
3.2.1 Instrumentación	26
3.2.2 Documentación y control de retroalimentación	28
3.3 BENEFICIOS	29
3.3.1 Mejora de la densidad	29
3.3.2 Incremento de la productividad	29
3.3.3 Reducción de los costos de reparación de carreteras	30
3.3.4 Registro continuo de valores de rigidez del material	30
3.3.5 Identificación de áreas no compactables	30
3.3.6 Mejora de la profundidad de compactación	31
3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	31
4. EQUIPOS DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE	32
4.1 RODILLOS IC DE UN SOLO TAMBOR.....	32
4.2 RODILLOS IC DE DOBLE TAMBOR.....	33
4.3 CONFIGURACIÓN Y REQUERIMIENTOS DEL GPS.....	34
4.4 TIPOS DE MEDIDAS DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE.....	35
5. DESCUBRIMIENTOS IMPORTANTES.....	39
5.1 COMPACTACIÓN INTELIGENTE DE SUELOS.....	39
5.2 COMPACTACIÓN INTELIGENTE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.....	40
6. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL SISTEMA DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE CON EL SISTEMA TRADICIONAL.....	42
7. CONCLUSIONES	47
BIBLIOGRAFÍA	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución por volumen, masa y peso	17
Tabla 2. Distribución por volumen, masa y peso en el suelo	19
Tabla 3. Valores típicos de γ_d -máx y w_{opt} para diferentes tipos de suelo	24
Tabla 4. Equipos recomendados según el proyecto y tipo de suelo a compactar.....	25
Tabla 5. Resumen de las medidas de IC.....	38
Tabla 6. Aspectos claves de los diferentes sistemas ICMV.....	39
Tabla 7. Tiempos de compactación y ensayos sistema tradicional o convencional.....	44
Tabla 8. Tiempos de compactación con el sistema inteligente.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aire, agua y fases sólidas en un suelo típico.....	17
Figura 2. Aparatos para pruebas de compactación en laboratorio.....	21
Figura 3. Resultado típico de una prueba de compactación.....	23
Figura 4. Sistema de Compactación Inteligente de BOMAG.....	27
Figura 5. Sistema de Control Automático de Retroalimentación (AFC, Auto-Feedback Control) de Case/Ammann.....	28
Figura 6. Rodillos IC de un solo tambor liso.....	33
Figura 7. Juego de carcasas patecabra para rodillos IC lisos.....	34
Figura 8. Rodillo IC patecabra de Sakai con juego de carcasas lisas.....	34
Figura 9. Rodillos IC de doble tambor.....	35
Figura 10. Receptor y antena RTK GPS sobre un rodillo Sakai.....	36
Figura 11. Esquema de un sistema de monitoreo de la compactación (ICMV).....	37

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Estado de la capa de subbase antes y después de compactar....	45
Fotografía 2. Estado de la capa de subbase antes y después de compactar....	46
Fotografía 3. Toma de densidades con cono y arena.....	46

RESUMEN

El proyecto contempla una recopilación bibliográfica acerca de la tecnología de Compactación Inteligente; basado en una descripción de los diferentes sistemas disponibles según el fabricante de equipos de compactación, y el análisis teórico de 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 económicos y técnicos en cuanto a disminución de tiempos en procesos de trabajo y uniformidad en la compactación.

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, y 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 en 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. El presente proyecto pretende dar a conocer con más detalle la metodología para la implementación y adquisición, además de los beneficios de su utilización.

PALABRAS CLAVE: SISTEMA INTEGRADO DE COMPACTACION INTELIGENTE, COMPACTADOR VIBRATORIO, SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GEOGRÁFICO (GPS), MÓDULO DE RIGIDEZ, EFICIENCIA DEL PROCESO DE TRABAJO-BENEFICIOS.

GLOSARIO

Prueba de compactación absoluta (ACT, Absolute Compaction Testing): este método ofrece al operador del equipo de compactación, los valores absolutos de la compactación lograda.

Acelerómetro: se usa para medir el movimiento relativo del tambor con respecto al marco del compactador, valor que posteriormente se relaciona empíricamente con el módulo de la capa compactada. En un sistema vibratorio compactador el tambor giratorio, gira un ángulo y se mueve una distancia horizontal hacia adelante y hacia atrás una vez que el tambor se eleva sobre la superficie del pavimento, luego la caída del tambor compacta la capa del pavimento. Este resultado proporciona la información necesaria para controlar los esfuerzos de compactación mediante el ajuste de un número de parámetros, como la dirección de la vibración (vertical, horizontal o cualquier ángulo intermedio) y la velocidad de avance del compactador.

Criterios de aceptación: son los criterios utilizados para aceptar el resultado de la compactación con rodillos, relacionados con las propiedades del material y el comportamiento del pavimento, como el módulo de rigidez y la densidad.

Característica de aceptación de calidad (AQC, Acceptance Quality Characteristic): es un parámetro que afecta el comportamiento del pavimento bajo el control del contratista y se mide durante o después de la construcción, como la densidad o el módulo de elasticidad.

Capacidad de carga o capacidad portante (BC, Bearing Capacity): En la ingeniería geotécnica se define como la capacidad del suelo para soportar las cargas aplicadas sobre él; la capacidad de carga última es la presión máxima teórica que puede soportarse sin fallas; mientras que la capacidad de carga admisible es la capacidad de carga última dividida por un factor de seguridad. También se define la capacidad portante como la presión de contacto promedio máxima entre la base, y el suelo que no producirá falla por corte en el suelo. La capacidad de carga del suelo es una consideración importante en los proyectos de construcción. Las presas, los estribos de los puentes y las estructuras de soporte temporal durante la construcción son ejemplos de estructuras que pueden ser soportadas por el suelo subyacente.

Mezclas asfálticas en frío (CMA, Cold Mix Asphalt): están conformadas por una combinación de agregados minerales no calentados y ligantes asfálticos emulsionados que pueden mezclarse en la planta o mezclarse en la obra (in situ). Las mezclas asfálticas en frío se usan principalmente para parcheos temporales.

Valor de control de compactación (CCV, Compaction Control Value): para el sistema de Compactación Inteligente de Caterpillar, el uso de CCV es una extensión del valor Geodynamic CMV (valor del medidor de compactación). Para el sistema

de Compactación Inteligente de Sakai, el uso de CCV se basa en la propia implementación de Sakai. Ambos métodos se basan en la medición de las amplitudes a diferentes frecuencias de vibración para determinar el CCV.

Sistema de documentación de compactación (CDS, Compaction Documentation System): es la herramienta definitiva para el control continuo de la compactación (CCC). Presenta al operador o controlador del rodillo toda la información relevante y necesaria para ayudar a lograr el rendimiento óptimo del trabajo de compactación.

Eficiencia de compactación: corresponde a los esfuerzos de compactación y recursos específicos gastados en un tiempo para alcanzar el valor de compactación objetivo.

Trabajos de compactación: con este término se hace referencia a los parámetros de compactación que incluyen principalmente la frecuencia de compactación, la amplitud y la velocidad de avance del equipo (rodillo compactador).

Índice de energía de compactación (CEI, Compaction Energy Index): se utiliza para estudiar los cambios en los trabajos de compactación, y también medir la cohesión y la adhesión de los ligantes. El compactador giratorio Superpave (SGC) se utiliza para determinar la resistencia de la mezcla a la densificación, con la cual se determinó un índice de energía de compactación (CEI).

Valor medido de compactación (CMV, Compaction Meter Value): es una medida del nivel de compactación, desarrollada por Geodynamik en la década de 1970. Se define como la relación del segundo armónico de la amplitud de aceleración del tambor vertical dividida por el primer armónico de la amplitud de aceleración del tambor vertical multiplicada por una constante **c** (por ejemplo, 300). El CMV reportado es el promedio de varios cálculos de 2 ciclos.

Medidor de compactación: es un dispositivo instrumentado en los rodillos de compactación para medir la densidad del material, el rebote de la capa y determinar la rigidez o el módulo del material.

Uniformidad de compactación: se obtiene de la comparación de las propiedades del material en diferentes puntos, tales como el módulo y la densidad del material.

Pruebas integrales: en la Compactación Inteligente el sistema prueba múltiples variables que incluyen el módulo del material, la densidad, la temperatura, etc.

Índice de calidad de construcción (CQI, Construction Quality Index): proporciona una herramienta práctica para la evaluación de la calidad de construcción de componentes individuales.

Control continuo de compactación (CCC, Continuous Compaction Control): se basa en medidores integrados a los rodillos que miden continuamente su aceleración y calculan un valor medido de compactación a partir de la señal de aceleración. Estos valores del medidor le dan al operador información para evitar compactar por debajo o por encima de los valores objetivo o de control (sobrecompactación o subcompactación).

Índice de penetración DCP: es un índice para caracterizar la resistencia del suelo utilizando el dispositivo de penetrómetro de cono dinámico (DCP, Dynamic Cone Penetrometer). Típicamente tiene una unidad de mm / golpe y está relacionado inversamente con la resistencia a la penetración (es decir, la resistencia del suelo).

Excitador dirigido: es un mecanismo de excitación que generalmente hace que el tambor se mueva verticalmente. En algunos casos, la dirección del movimiento se puede cambiar a través de un arco de 90 grados de vertical a horizontal.

Compactador de doble tambor vibratorio (DDV, Double Drum Vibratory): este compactador utiliza tambores dobles que pueden tener diferentes medidas y es especialmente adecuado para mezclas tiernas que requieren satisfacer una densidad mínima o un contenido máximo de vacíos de aire. Se puede usar un compactador DDV aunque tenga diferentes medidas. Sin embargo, para mezclas tiernas con alta fluidez, se debe estar pendiente de la operación del rodillo para que se alcance la densidad de la mezcla en la zona de temperatura superior antes de que la mezcla comience a moverse y desplazarse. Las mezclas en caliente que tienen características tiernas tienen que compactarse a un nivel mínimo de densidad o a un nivel máximo de contenido de vacíos de aire. En consecuencia, los rodillos vibratorios de tambor doble se han usado para resolver este problema. El rodillo DDV debe mantenerse cerca de la pavimentadora para proveer su efecto inicial (breakdown effect) inmediatamente cuando la mezcla aún está caliente.

Doble salto: Es una condición en la cual el tambor se salta cualquier otro impacto, porque ha adquirido tanta energía que comienza a moverse hacia arriba durante un ciclo vibratorio antes de tocar el suelo.

Amplitud del tambor: la amplitud del tambor controla principalmente la profundidad de penetración de las fuerzas de compactación vibratorias, generalmente se utilizan amplitudes más bajas para los pavimentos más delgados, mientras que las amplitudes más altas se utilizan para los pavimentos más gruesos.

Espaciado de impacto del tambor: El espaciado de impacto del tambor óptimo se puede determinar mediante el estrechamiento o ensanchamiento en función del diámetro del tambor y la experiencia de compactación.

Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP, Dynamic Cone Penetrometer): es un dispositivo utilizado para medir la resistencia al corte y. proporciona un índice de

resistencia del suelo compactado. La prueba consiste en dejar caer un martillo de 8 kg de 575 mm y medir la tasa de penetración de un cono de 20 mm de diámetro.

Módulo dinámico: Es la relación entre el esfuerzo y la deformación bajo condiciones vibratorias, ya sea para pruebas de vibración libres o forzadas, en corte, compresión o elongación de materiales viscoelásticos.

Compactador dinámico: es un tipo de rodillo que aplica un mecanismo de vibración o un mecanismo oscilante combinando cargas estáticas y dinámicas para aplicar esfuerzos de compactación y alcanzar la densidad objetivo durante la compactación.

Módulo elástico: también se denomina módulo de elasticidad, es la descripción matemática de la tendencia de un objeto o sustancia a deformarse elásticamente (es decir, de forma no permanente) cuando se le aplica una fuerza. El módulo elástico de un objeto se define como la pendiente de su curva de esfuerzo-deformación en la región de deformación elástica.

INTRODUCCIÓN

En Colombia el control de la compactación de suelos de subrasante, rellenos y capas del pavimento se hace aún mediante la toma puntual de densidades, ya sea por el método del cono y arena, el balón de caucho o mediante el densímetro nuclear, que a pesar de ser medidas eficientes se limitan solamente a la zona inspeccionada y por consiguiente deben aceptarse como representativas de un área mayor. De esta manera, en caso que el grado de compactación medido esté por encima de lo especificado, significa que se pueden estar aceptando sitios insuficientemente densificados, y lo que es igualmente grave, si el grado de compactación está por debajo se recomendaría sobrecompactar en toda el área o lote, lo que implica rotura de partículas y cambios en la gradación del material, que también conllevan implicaciones dañinas en la durabilidad de la estructura del pavimento construido.

La tecnología de Compactación Inteligente (IC) puede ser beneficiosa para varios tipos de materiales de pavimentación, incluyendo suelos de subrasante, subbases y mezclas asfálticas. No obstante, en nuestro medio no se ha implementado aparentemente por falta de conocimiento suficiente de las ventajas que trae. Así entonces este trabajo pretende investigar y dar a conocer los equipos y tecnologías disponibles, los sistemas de manejo e integración de datos y algunas especificaciones que existen para el control y aseguramiento de la calidad de las obras, la transferencia tecnológica para que pueda ser requerida y adoptada en nuestro medio.

Así entonces, el control de automatización tecnológica de compactación en la totalidad del área que permite llevar a cabo el sistema de Compactación Inteligente, no sólo incrementa la productividad en grandes obras, además evita aprobar áreas insuficientemente densificadas y adicional la trituración que produce un exceso de finos por sobrecompactación. 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.

La primera parte del proyecto consiste en una investigación bibliográfica acerca de la tecnología de Compactación Inteligente, que incluye explicar en qué consiste los fundamentos teóricos del sistema y sus beneficios, los requerimientos de equipos y software para procesar los datos medidos, las especificaciones existentes en los EE.UU. para controlar la rigidez de las capas del pavimento compactadas (entendiendo esta rigidez como un indicativo de su densidad) y adicionalmente los problemas documentados de adopción de esta tecnología.

La segunda parte contempla investigar el sistema integrado de compactación inteligente, cualificar y cuantificar los beneficios de la utilización del mismo, ya sea mostrando los resultados documentados de proyectos en los EE.UU.

implementados con éxito, o mediante análisis comparativos sencillos que permitan establecer una viabilidad para adquirir los equipos y hacer la transferencia tecnológica necesaria.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Exponer la tecnología de Compactación Inteligente (funcionamiento, equipos, ventajas, especificaciones e implementación del sistema y experiencias) y evaluar el tiempo - beneficio en los procesos de trabajo para determinar su aplicabilidad en obra vial.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Exponer las bases teóricas del sistema de Compactación Inteligente, así como sus ventajas demostradas, los requerimientos de equipos y en adición el procedimiento para implementar el sistema junto con las especificaciones que controlan su correcta aplicación en los EE.UU.
- Determinar los diferentes equipos disponibles en el mercado utilizados para la Compactación Inteligente en los EE.UU.
- Presentar evaluación del tiempo en los procesos de trabajo y los beneficios de la aplicación de compactación inteligente, basados en los análisis de casos presentados en diferentes publicaciones que sirvan como guía para cualificar ahorros financieros y beneficios económicos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINICIONES BÁSICAS Y TERMINOLOGÍA DE SUELOS¹

El suelo es un material de tres fases que consiste en partículas sólidas que forman el suelo esqueleto y vacíos que pueden estar llenos de agua si el suelo está saturado, pueden estar llenos de aire si el suelo está seco o pueden estar parcialmente saturados como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Aire, agua y fases sólidas en un suelo típico.

Es útil considerar cada fase individualmente como se muestra en la Tabla 1.

Fase	Volumen	Masa	Peso
Aire	V_A	0	0
Agua	V_W	M_W	W_W
Sólidos	V_S	M_S	W_S

Tabla 1. Distribución por volumen, masa y peso

2.1.1 Unidades

Para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería se usan las siguientes unidades:

Longitud	metros
Masa	toneladas (t) $1t = 10^3 \text{ kg}$
Densidad (masa / volumen unitario)	t/m^3
Peso	kilonewtons (kN)
Esfuerzo	kilopascasles (kPa) $1 \text{ kPa} = 1 \text{ kN/m}^2$
Peso unitario	kN/m^3

Con suficiente precisión, la densidad del agua está dada por $\rho_w = 1 \text{ t/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$

En la mayoría de las aplicaciones, no es la masa lo que es importante, sino la fuerza debida a la masa: el peso, W , que está relacionado con la masa, m , por la relación $W = m \cdot g$, donde $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

Debido a que generalmente se requiere la fuerza, a menudo es conveniente en los cálculos usar el peso unitario, γ (peso por unidad de volumen), que se calcula como: $\gamma = W/V = m \cdot g / V = \rho \cdot g$. El peso unitario del agua es $\gamma_w = 9,8 \text{ kN/m}^3$

2.1.2 Gravedad específica

Otra cantidad utilizada con frecuencia es la gravedad específica, G , que se define por: $G = \text{Densidad del material} / \text{Densidad de agua} = \rho / \rho_w$ ó $G = \text{Peso unitario del material} / \text{Peso unitario de agua} = \gamma / \gamma_w$.

A menudo se encuentra que la gravedad específica de los sólidos (G_s) que componen las partículas del suelo están cerca del valor para el cuarzo, eso es $G_s \approx 2,65$. Para los minerales formadores de suelos más comunes $2,5 < G_s < 2,8$.

Así entonces, se puede usar G_s para calcular la densidad o el peso unitario de las partículas sólidas:

$$\begin{aligned}\rho_s &= G_s \rho_w \\ \gamma_s &= G_s \gamma_w\end{aligned}$$

y de ahí el volumen de las partículas sólidas si se conoce la masa o el peso:

$$V_s = m_s / (G_s \cdot \rho_w) = W_s / (G_s \cdot \gamma_w)$$

2.1.3 Relación de vacíos y porosidad

Usar volúmenes no es muy conveniente en la mayoría de los cálculos. Una medida alternativa que se usa es la razón de vacíos, e . Esto se define como la relación del volumen de vacíos, V_v , con el volumen de sólidos, V_s , eso es:

$$e = V_v / V_s$$

dónde: el volumen de vacíos es $V_v = V_w + V_a$
y el volumen total es $V = V_a + V_w + V_s$

Una cantidad relacionada es la porosidad, n , que se define como la relación del volumen de vacíos respecto al volumen total.

$$n = V_v / V$$

La relación entre e y n puede determinarse observando que: $V_s = V - V_v = (1 - n) V$, por lo tanto $e = V_v/V_s = V_v / ((1-n).V) \rightarrow e = n/(1-n)$ y $n = e/(1+e)$.

2.1.4 Grado de saturación

El grado de saturación, S , tiene una influencia importante en el comportamiento del suelo. Es definido como la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos y se expresa normalmente en porcentaje.

$$S = V_w / V_v = V_w / (V_a + V_w)$$

La distribución de las fases de volumen puede expresarse en términos de e y S , y conociendo el peso unitario del agua y la gravedad específica de las partículas las distribuciones en peso también se pueden determinar como se indica en la Tabla 2.

$$S = V_w / V_v = V_w / (e.V_s)$$

$$V_w = e.S.V_s$$

Fase	Volumen	Masa	Peso
Aire	$e(1-S)$	0	0
Agua	$e.S$	$e.S.\rho_w$	$e.S.\gamma_w$
Sólidos	1	$G_s.\rho_w$	$G_s.\gamma_w$

Tabla 2. Distribución por volumen, masa y peso en el suelo.

Tenga en cuenta que la Tabla 2 supone un volumen sólido $V_s = 1 \text{ m}^3$, y todos los términos en la tabla deben ser multiplicado por V si este no es el caso.

2.1.5 Pesos unitarios

Varios pesos unitarios se usan en mecánica de suelos, estos son totales, saturados, secos y pesos unitarios sumergidos.

El peso unitario total simplemente se define como el peso por unidad de volumen:

$$\gamma = W / V$$

Cuando todos los vacíos están llenos de agua, el peso unitario total es idéntico al peso unitario saturado, γ_{sat} , y cuando todos los vacíos se llenan con aire, el peso unitario total es idéntico al peso unitario seco, γ_d . De la Tabla 2 se deduce que:

$$\gamma = W / V = (\gamma_w.G_s + \gamma_w.e.S) / (1+e) = \gamma_w.(G_s + e.S) / (1+e)$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \gamma_w \cdot (G_s + e) / (1 + e) \text{ cuando } S=1 \text{ (suelo saturado)}$$

$$\gamma_d = \gamma_w \cdot G_s / (1 + e) \text{ cuando } S=0 \text{ (suelo seco)}$$

Debe tenerse en cuenta que cuando se habla de suelos saturados, es común analizar su peso unitario seco. Esto se hace porque el peso unitario seco está relacionada directamente con la relación de vacíos, y por lo tanto es una forma de describir la cantidad de vacíos.

El peso unitario sumergido, γ' , a veces es útil cuando el suelo está saturado, y está dado por:

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$$

2.1.6 Contenido de humedad

El contenido de humedad, w , es una cantidad muy útil porque es simple de medir. Está definida como la relación entre el peso del agua y el peso del material sólido medido:

$$w = W_w / W_s$$

Si se expresan los pesos en términos de e , S , G_s y γ_w , como antes, se obtiene:

$$\begin{aligned} W_w &= \gamma_w \cdot V_w = \gamma_w \cdot e \cdot S \cdot V_s \\ W_s &= \gamma_s \cdot V_s = \gamma_w \cdot G_s \cdot V_s \end{aligned}$$

y por lo tanto,

$$w = e \cdot S / G_s$$

2.2 FUNDAMENTOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS²

La compactación es la aplicación de energía mecánica a un suelo para reordenar las partículas y reducir la relación de vacíos.

La razón principal para compactar el suelo es reducir los futuros asentamientos bajo cargas de trabajo. La compactación aumenta la resistencia al corte del suelo y reduce la proporción de vacíos, lo que dificulta el flujo de agua a través del suelo. Esto es importante si el suelo se usa para retener agua, como es necesario para una presa de tierra.

La compactación puede evitar la acumulación de grandes presiones de agua que hacen que se produzca en suelos granulares licuefacción durante los terremotos.

2.2.1 Factores que afectan la compactación

Entre los principales factores que afectan la compactación están:

- El contenido de agua del suelo.
- El tipo de suelo que se compacta.
- La cantidad de energía aplicada para compactar.

2.2.2 Pruebas de compactación de laboratorio

Hay varios tipos de pruebas que pueden usarse para estudiar las propiedades de compactación de los suelos. Debido a la importancia de la compactación en la mayoría de los trabajos de compactación de tierras han sido desarrollados procedimientos estándar. Estos generalmente implican la compactación del suelo en un molde con diversos contenidos de humedad.

2.2.2.1 Prueba de compactación estándar. El suelo se compacta en un molde en 3 capas iguales, recibiendo cada capa 25 o 56 golpes de un martillo de peso estándar, dependiendo si se utiliza el molde pequeño (suelo retenido en el tamiz de 9,5 mm es menos del 20% en peso) o el molde grande (suelo retenido en el tamiz de 9,5 mm es más del 20% en peso y suelo retenido en el tamiz de 19 mm es menos del 30% en peso). El aparato se muestra a continuación en la Figura 2. La energía (esfuerzo de compactación) suministrada en esta prueba es aproximadamente 595 kJ/m^3 .

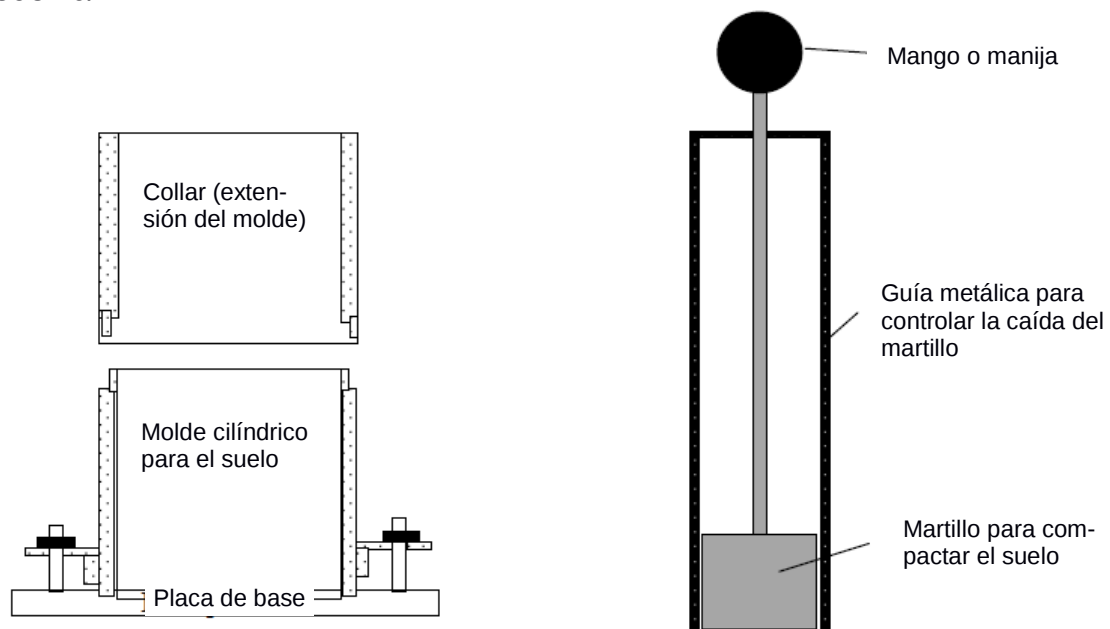


Figura 2. Aparatos para pruebas de compactación en laboratorio.

Las dimensiones importantes son:

Masa del martillo	24,4 N
Altura de caída del martillo	304,8 mm
Volumen del molde	943,3 cm ³ molde pequeño y 2124 cm ³ molde grande

Debido a los beneficios de la compactación, los contratistas han construido grandes y pesadas máquinas para aumentar el área y la profundidad de compactación del suelo y consecuentemente el rendimiento en obra. Teniendo en cuenta que al poco tiempo de haber estandarizado el ensayo se detectó que la prueba de compactación estándar no pudo reproducir las densidades medidas en el campo, esto condujo al desarrollo de la prueba de compactación modificada.

2.2.2.2 Prueba de compactación modificada. El procedimiento y el equipo son esencialmente los mismos que los utilizados para la prueba estándar excepto que se debe compactar en 5 capas. Si el material tiene menos del 20% de gravas mayores a 9,5 mm se utiliza el molde pequeño (métodos A y B) y se aplican 25 golpes/capa, si tiene más de 20% de gravas mayores a 9,5 mm y menos del 30% de gravas mayores a 19 mm se utiliza el molde grande (Método C) y se aplican 56 golpes/capa). Para proporcionar un mayor esfuerzo de compactación (energía suministrada = 2072 kJ/m³) se usa un martillo más pesado y con una mayor altura de caída. Las dimensiones clave para la prueba modificada son:

Masa del martillo	44,5 N
Altura de caída del martillo	457,2 mm
Volumen del molde	943,3 cm ³ molde pequeño y 2124 cm ³ molde grande

2.2.3 Resultados del ensayo de compactación

Para evaluar el grado de compactación es importante usar el peso unitario seco, γ_d , porque lo que se busca es aumentar el peso de las partículas de suelo sólido en un volumen dado, no la cantidad de sólidos, aire y agua en un volumen dado (que es el peso unitario total). De las relaciones derivadas anteriormente se tiene:

$$\gamma_d = G_s \cdot \gamma_w / (1 + e)$$

Despejando:

$$e = G_s \cdot \gamma_w / \gamma_d - 1$$

Dado que G_s y γ_w son constantes, se puede concluir que el aumento de la densidad seca implica la disminución de la relación de vacíos y un suelo más compacto. En la prueba, la densidad seca no se puede medir directamente, lo que se mide es la densidad total y el contenido de humedad. De las definiciones se tiene:

Peso unitario total, $\gamma = W / V = (W_s + W_w) / V$

Peso unitario seco, $\gamma_d = W_s / V$

Humedad, $w = W_w / W_s$

Por lo tanto, $\gamma = (W_s + W_w) / V = (1 + w) W_s / V$

$$\gamma = (1 + w) \gamma_d$$

Esto permite dibujar la variación del peso unitario seco con el contenido de humedad, obteniendo la curva típica para materiales granulares y suelos con límites líquidos entre 30 y 70, que se muestra a continuación en la Figura 3. De este gráfico podemos determinar el contenido de humedad óptimo, m_{opt} , para el peso unitario seco máximo, $(\gamma_{dry})_{max}$.

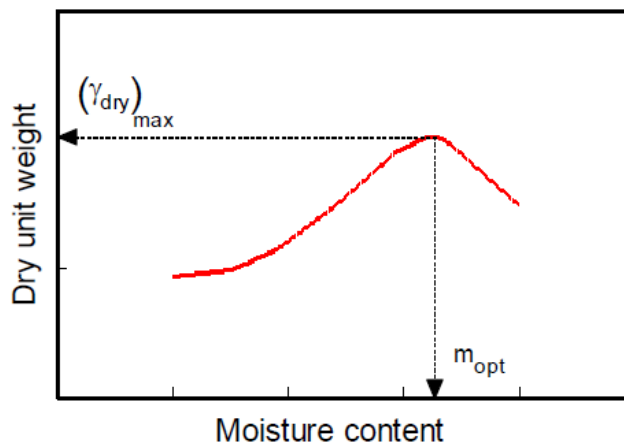


Figura 3. Resultado típico de una prueba de compactación.

2.2.4 Efectos del contenido de agua en la compactación.

A medida que se agrega agua a un suelo (con bajo contenido de humedad) se vuelve más fácil para las partículas moverse o acomodarse durante la aplicación de las fuerzas de compactación. Cuando el suelo se compacta los vacíos se reducen y esto causa que el peso unitario seco (densidad seca) aumente.

Inicialmente, a medida que aumenta el contenido de humedad, también lo hace el peso unitario seco. Sin embargo, el aumento no puede ocurrir indefinidamente porque el suelo se acerca a la línea de cero vacíos de aire que da el peso unitario seco máximo para un contenido de humedad dado. Por lo tanto, a medida que el estado del suelo se acerca a la línea de vacíos sin aire y su contenido de humedad aumenta se produce una reducción en el peso unitario. Consecuentemente, cuando

la curva de compactación se acerca a la línea de cero vacíos de aire, se alcanza un peso unitario seco máximo y el contenido de humedad correspondiente a este máximo se llama contenido de humedad óptimo.

2.2.5 Efectos de incrementar el esfuerzo de compactación

Aumentar el esfuerzo de compactación permite obtener mayores pesos unitarios secos, los cuales debido a la forma de la línea vacíos sin aire deben ocurrir a un contenido de humedad óptima inferior. Debe tenerse en cuenta que para contenidos de humedad mayores que el óptimo, el uso de maquinaria de compactación más pesada tendrá solo un pequeño efecto sobre el aumento de los pesos unitarios secos. Por esta razón, es importante tener un buen control del contenido de humedad durante la compactación de capas de suelo en el campo.

Según lo anterior, la curva de compactación no es una característica única del suelo, ya que depende de la energía de compactación. Por esta razón es importante cuando se dan los valores de la densidad seca máxima y la humedad óptima, especificar también el procedimiento de compactación utilizado (por ejemplo, estándar o modificado).

2.2.6 Efectos del tipo de suelo

La tabla a continuación contiene valores típicos para diferentes tipos de suelo obtenidos del ensayo de compactación estándar.

Suelos		Valores típicos	
		$\gamma_d\text{-máx (kN/m}^3\text{)}$	$w_{\text{opt}} \text{ (%)}$
Arena bien gradada	SW	22	7
Arena arcillosa	SC	19	12
Arena pobremente gradada	SP	18	15
Arcilla de baja plasticidad	CL	18	15
Limo no plástico	ML	17	17
Arcilla de alta plasticidad	CH	15	25

Tabla 3. Valores típicos de $\gamma_d\text{-máx}$ y w_{opt} para diferentes tipos de suelo

Es de anotar que estos son valores típicos. Debido a la variabilidad de los suelos no es apropiado usar valores típicos para diseño, siempre se requieren ensayos.

2.2.7 Especificaciones de campo

Para controlar las propiedades del suelo en las construcciones de tierra (por ejemplo, represas, carreteras) es habitual especificar que el suelo debe compactarse con un peso unitario seco predeterminado. Esta especificación se refiere generalmente a que debe ser logrado un cierto porcentaje de la densidad

seca máxima encontrada a partir de un ensayo de laboratorio (Estándar o Modificado). Por ejemplo, se podría especificar que las densidades de campo deben ser mayores que el 98% del peso unitario seco máximo determinado a partir de la prueba de compactación estándar. Así entonces, el contratista seleccionará la maquinaria, el espesor de cada capa de suelo o agregado y controlará los contenidos de humedad para lograr la cantidad especificada de compactación.

Hay una amplia gama de equipos de compactación. Para pavimentos algún tipo de equipo como un rodillo con ruedas o una placa vibratoria son normalmente utilizados. Estos solo afectan una pequeña profundidad del suelo. Para lograr un alcance a profundidades mayores, se pueden usar pilas vibratorias y pesas de caída. La aplicabilidad del equipo depende del tipo de suelo como se indica en la tabla a continuación.

Equipos	Suelos más apropiados	Aplicación típica	Suelos menos apropiados
Rodillos metálicos lisos, estáticos o vibratorios	Mezclas de arenas y gravas bien gradadas, roca triturada, asfaltos.	Superficies de rodadura, capas de base, subbases granulares.	Arenas uniformes
Compactadores neumáticos o de llantas	Suelos de grano grueso con algunos finos	Subrasantes para pavimentos	Suelos gruesos uniformes y rocas.
Compactadores de rejilla	Roca meteorizada, suelos gruesos bien gradados.	Subrasantes, subbases.	Arcillas, arcillas limosas, materiales uniformes.
Compactadores pata de cabra, estáticos	Suelos de grano fino con más del 20% de finos	Presas, terraplenes, subrasantes.	Suelos gruesos, suelos con guijarros, piedras.
Compactadores pata de cabra, vibratorios	Igual que arriba, pero también mezclas de arena y grava	Capas de subrasante	
Placas vibratorias	Suelos gruesos, 4 a 8% de finos	Parches pequeños	Arcillas y limos
Apisonadoras	Todos los tipos	Áreas de difícil acceso	
Rodillos de impacto	La mayoría de suelos saturados y húmedos.		Secos, arenas y gravas.

Tabla 4. Equipos recomendados según el proyecto y tipo de suelo a compactar.

3. FUNDAMENTOS DE LA COMPACTACIÓN INTELIGENTE

3.1 DEFINICIÓN

El término Compactación Inteligente (IC, Intelligent Compaction) se refiere a la compactación de materiales de carreteras como suelos, bases de agregados o materiales de pavimento asfáltico, utilizando rodillos vibratorios modernos equipados con un sistema de medición integrado, un sistema de reportes informáticos a bordo, un mapeo basado en el sistema de posicionamiento global (GPS) y un control de retroalimentación opcional. Los rodillos de Compactación Inteligente facilitan el monitoreo de la compactación en tiempo real y los ajustes oportunos al proceso de compactación al integrar los sistemas de medición, documentación y control. Los rodillos de Compactación Inteligente también mantienen un registro continuo en gráficos codificados por colores, lo que permite al usuario ver trazados de la ubicación precisa del rodillo, el número de pasadas de 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 mejor y duradero comportamiento. Los materiales del pavimento a menudo poseen densidades óptimas que aseguran un soporte, estabilidad y resistencia adecuados, lograr estas densidades de manera uniforme es la clave, y la Compactación Inteligente ayuda en 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. La Compactación Inteligente ayuda a los usuarios a superar este problema optimizando el proceso de compactación.

3.2 MECANISMO DE TRABAJO

Los rodillos de Compactación Inteligente son rodillos vibratorios equipados con instrumentación que alimenta a un sistema de documentación y control de retroalimentación que procesa datos de compactación en tiempo real para el operador.

3.2.1 Instrumentación

La ubicación precisa del rodillo, su velocidad y el número de pasadas en una ubicación determinada se asignan utilizando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) o un sistema similar. Estos sistemas de mapeo se utilizan comúnmente para establecer pendientes y controlar otras piezas del equipo.

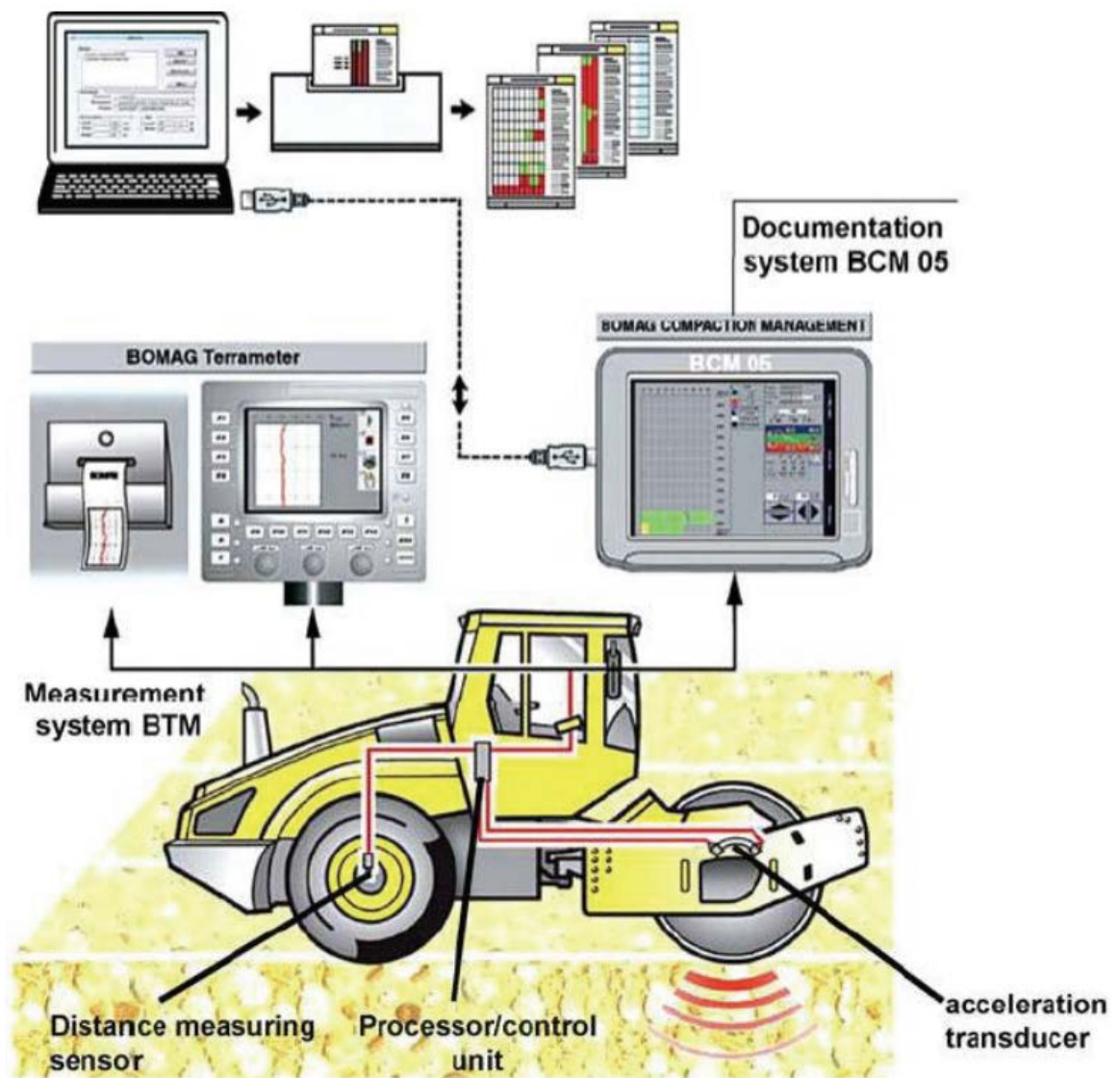


Figura 4. Sistema de Compactación Inteligente de BOMAG.

Para determinar la efectividad del proceso de compactación, los medidores de compactación o los acelerómetros se montan en el tambor o alrededor de este para controlar el esfuerzo de compactación aplicado, la frecuencia y la respuesta del material que se compacta. La metodología utilizada para calcular la respuesta del material a menudo es de propiedad exclusiva del fabricante del equipo. La respuesta del suelo se puede describir mediante un índice de compactación o valores de rigidez / módulo. Las tiras, secciones o tramos de prueba del proyecto a menudo se calibran para correlacionar el índice de compactación o los valores de rigidez / módulo con las mediciones in situ convencionales, como el módulo del material o su densidad.

Para rodillos de asfalto el equipo de Compactación Inteligente cuenta con una instrumentación de temperatura adicional que permite al usuario controlar la temperatura de la superficie del material asfáltico del pavimento. Esto es crítico ya que la compactación vibratoria dentro de ciertos rangos de temperatura puede causar efectos adversos.

3.2.2 Documentación y control de retroalimentación

Una característica fundamental que poseen los rodillos de Compactación Inteligente es un sistema para recolectar, procesar y analizar las mediciones en tiempo real. Esta característica permite al operador del rodillo ver el mapa codificado con colores que muestra instantáneamente la interacción entre la ubicación del rodillo y el número de pasadas, el esfuerzo de compactación acumulativo y la respuesta del material. Los controles de retroalimentación opcionales pueden utilizar estos datos para ajustar continuamente la fuerza y la frecuencia del tambor a fin de maximizar la eficiencia y la efectividad.

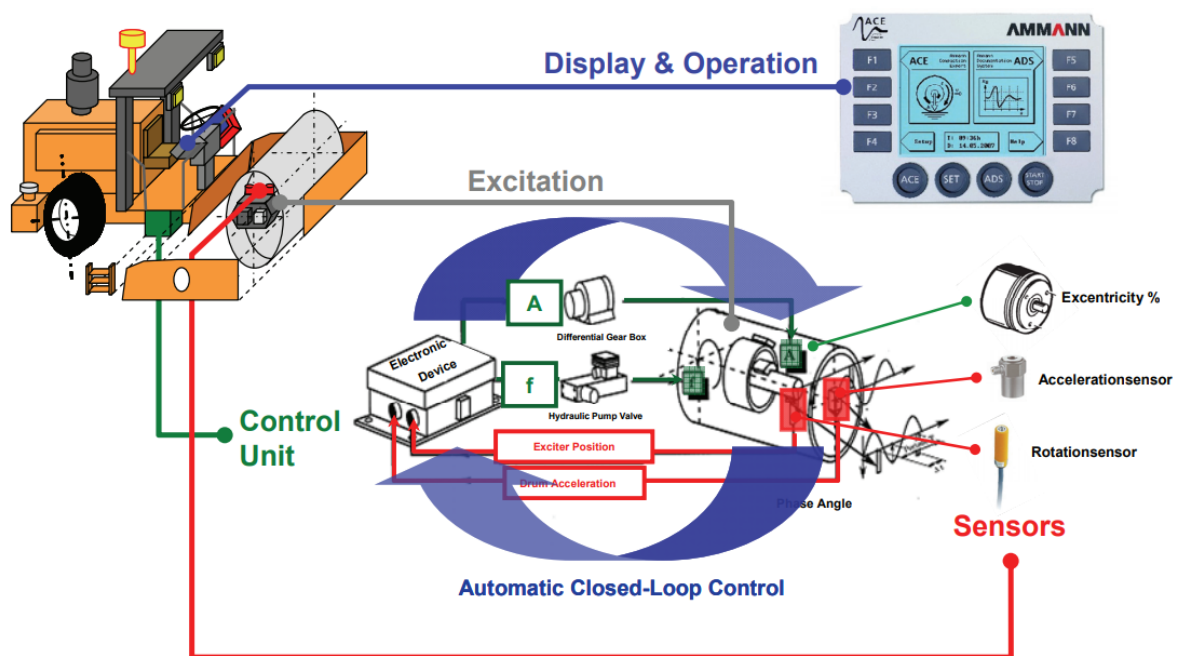


Figura 5. Sistema de Control Automático de Retroalimentación (AFC, Auto-Feedback Control) de Case/Ammann.

La pantalla en el rodillo de Compactación Inteligente alerta al operador cuando se obtiene la compactación deseada, eliminando pasadas innecesarias. Si se detectan áreas problemáticas, el sistema notificará al operador cuando pasadas de rodillos adicionales no den como resultado la compactación deseada. A continuación, documentará las áreas problemáticas para su posterior análisis.

Algunos rodillos de Compactación Inteligente, a saber, algunos rodillos de doble tambor para los materiales asfálticos del pavimento, no están equipados con sistemas de medición basados en acelerómetros. Sin embargo, todavía hay muchos beneficios al recolectar los datos de las pasadas del rodillo de Compactación Inteligente y las temperaturas de la capa de asfalto.

3.3 BENEFICIOS

Los principales beneficios de la Compactación Inteligente se pueden categorizar en las siguientes áreas:

- Mejora de la densidad.
- Incremento de la productividad.
- Reducción de los costos de reparación de carreteras.
- Registro continuo de valores de rigidez del material.
- Identificación de áreas no compactables.
- Mejora de la profundidad de compactación.

3.3.1 Mejora de la densidad

La tecnología de Compactación Inteligente tiene el potencial de mejorar la densidad en el lugar de los materiales del pavimento, una realidad que ha sido bien documentada por proyectos en Europa, Asia y los Estados Unidos. En particular, esta tecnología puede reducir significativamente la variabilidad de la densidad medida. Las densidades in situ pobres o deficientes se han identificado como el principal factor en la falla prematura del pavimento, el mejoramiento de la densidad de los materiales del pavimento tiene beneficios obvios. Las agencias y el público reciben un mejor rendimiento de su inversión monetaria en pavimentos cuando sus fondos pueden alargar la vida útil y reducir los costos de mantenimiento. Al invertir en tecnología de Compactación Inteligente, se está invirtiendo en procesos de compactación que pueden lograr estas hazañas con densidades de material consistentemente altas y uniformes.

3.3.2 Incremento de la productividad

Una operación de compactación es más eficiente cuando la densidad óptima se obtiene rápidamente por un número mínimo de pasadas. La optimización de la productividad aumenta la cantidad de material de la carretera que se puede construir en un día típico de producción. Debido a que los sistemas de Compactación Inteligente están diseñados para operar a un esfuerzo de compactación óptimo, la compactación es más eficiente. El resultado: niveles de densidad equivalentes o mejores en menos tiempo y con menos pasadas de rodillos de las que normalmente se requieren.

3.3.3 Reducción de los costos de reparación de carreteras

Por lo general, la industria espera un rendimiento adecuado del pavimento durante un período específico (a menudo 20 años en EE.UU) después de que se construye una nueva capa de superficie de pavimento o una nueva estructura de pavimento. La densidad inadecuada del material debido a una mala compactación reduce esta vida útil esperada y aumenta los costos de reparación de la carretera.

Al usar Compactación Inteligente, los contratistas pueden minimizar las reparaciones con un método de compactación optimizado destinado a mejorar el rendimiento del pavimento. Específicamente, este método mejorado para lograr densidades uniformemente adecuadas tiene como objetivo reducir la ocurrencia de fallas puntuales y mejorar la eficiencia de las operaciones de compactación, lo que reduce los costos para los contratistas de pavimentación, las entidades estatales (en este caso los DOT en EE.UU, Department of Transportation) y el público viajero.

3.3.4 Registro continuo de valores de rigidez del material

La Compactación Inteligente posee la capacidad de medir continuamente la rigidez durante el proceso de compactación, lo que ayuda a la compactación óptima, y después del proceso constituye una herramienta de diseño o aceptación para el material in situ. Esta característica es un desarrollo emocionante en la ingeniería de carreteras: los posibles beneficios incluyen la identificación instantánea de áreas débiles que necesitan ser revisadas o recompactadas, evitar la sobrecompactación dañina y el uso potencial en el diseño o las especificaciones de rendimiento a través de la integración con los valores del módulo de pavimento.

3.3.5 Identificación de áreas no compactables

Al comparar los resultados de las pasadas de rodillos posteriores, los usuarios de la Compactación Inteligente pueden realizar evaluaciones para determinar si el soporte de los materiales subyacentes es adecuado para la compactación completa del material del pavimento. Con este sistema, los usuarios pueden identificar puntos débiles o proyectos defectuosos.

Esta nueva herramienta es valiosa para el personal del proyecto: les permite tomar una decisión informada con respecto al curso de acción adecuado durante la compactación. Existen varias opciones: eliminación y reemplazo de materiales subyacentes débiles, estabilización y recompactación de materiales subyacentes o modificación de los requisitos de compactación para el material específico. Los usuarios ahora poseen la capacidad de determinar con mayor precisión los puntos débiles de su proyecto y evaluar sus opciones posteriores para un resultado exitoso.

3.3.6 Mejora de la profundidad de compactación

IC puede aumentar la amplitud máxima utilizada durante los pases de rodillo iniciales. Esta característica mejora los rodillos convencionales al integrar sistemas de medición y control que optimizan el esfuerzo de compactación de los rodillos IC en función de la rigidez medida. El aumento de la amplitud máxima puede resultar en una compactación efectiva de elevaciones más profundas de varios materiales de pavimento. La evaluación de los materiales base de agregados gruesos en los EE. UU. ha producido evidencia para confirmar la utilidad de esta característica.

3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Las tecnologías de Compactación Inteligente (IC, Intelligent Compaction) pueden ser beneficiosas para varios materiales del pavimento, incluidos suelos de subrasante, subbases, bases y materiales asfálticos.

El Mapa de Ruta de la Compactación Inteligente (IC Road Map), elaborado por la Federal Highway Administration (FHWA) describe la forma más eficiente de comenzar a implementar este sistema: estas estrategias ayudarán a superar posibles brechas o barreras. El mapa de ruta consta de cuatro pasos principales con tres subdivisiones o pasos menores dentro de cada uno:

Paso 1: Equipos y tecnologías

- 1.1: Estandarización de sistemas de medición de rodillo IC
- 1.2: Uso práctico del GPS en IC
- 1.3: Pruebas válidas de punto in situ para correlacionar con mediciones de IC

Paso 2: Gestión e integración de datos

- 2.1: Base de datos IC nacional y directrices de recopilación de datos
- 2.2: Estandarización de almacenamiento e intercambio de datos IC
- 2.3: Herramienta de software para visualización e informes de datos IC

Paso 3: Especificaciones

- 3.1: Directrices nacionales para las especificaciones IC QC / QA
- 3.2: Grupo de tareas de expertos (ETG, Expert Task Group) para el desarrollo de la especificación AASHTO IC
- 3.3: Soporte técnico para el desarrollo y personalización de especificaciones

Paso 4: Transferencia de tecnología y capacitación

- 4.1: Talleres de IC y certificación
- 4.2: Demostración de campo de IC
- 4.3: Sitio web de IC y base de conocimiento

4. EQUIPOS DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE

4.1 RODILLOS IC DE UN SOLO TAMBOR

Los rodillos IC utilizados para compactar la subrasante natural y los agregados usan un solo tambor, como se muestra en la Figura 6. Los tambores pueden ser lisos o equipados con un juego de carcasas patecabra. El sistema de rodillos IC de tambor único Sakai consiste, por el contrario, en un rodillo patecabra equipado con un juego de carcasas lisas. Siendo una forma más directa de IC, actualmente hay más experiencia, rodillos disponibles, y un más completo historial de construcción con tierra y agregados.

Ammann/Case



Caterpillar



Dynapac



Bomag America



Sakai America



Figura 6. Rodillos IC de un solo tambor liso.



Figura 7. Juego de carcasas patecabra para rodillos IC lisos.



Figura 8. Rodillo IC patecabra de Sakai con juego de carcasas lisas.

4.2 RODILLOS IC DE DOBLE TAMBOR

Los rodillos IC utilizados para compactar materiales asfálticos para pavimentos utilizan una configuración de doble tambor, como se muestra en la Figura 9. Monitorear y automatizar los controles de retroalimentación para dos tambores vibratorios añade complejidad al proceso de IC para materiales asfálticos para pavimentos. Además, el tiempo de rodado y la temperatura de la capa son críticos al compactar los materiales asfálticos. Por esta razón, se necesitan instrumentos y consideraciones adicionales cuando se utiliza tecnología IC para estos materiales.



Figura 9. Rodillos IC de doble tambor.

4.3 CONFIGURACIÓN Y REQUERIMIENTOS DEL GPS

No se puede enfatizar lo suficiente para la recopilación de datos de GPS en la implementación de IC. Para asegurar una recopilación de datos precisa y consistente, las siguientes capacidades para los sistemas GPS de rodillos son necesarias:

- Sistemas RTK GPS (GPS cinemático en tiempo real) en rodillos IC (consulte la Figura 9 para el GPS configuración del receptor en un rodillo Sakai),
- Informes del sistema y registros de valores en Norte y Este y posición vertical en metros en coordenadas UTM (aunque las coordenadas estatales y las coordenadas del condado son comúnmente utilizados en los EE. UU.) para el sitio del proyecto, y
- Si es necesaria una compensación entre la antena del GPS y el centro del tambor delantero, debe haber sido entrada y validada.



Figura 10. Receptor y antena RTK GPS sobre un rodillo Sakai.

A menudo se recomienda la asistencia técnica de los vendedores de rodillos o fabricantes de equipos de GPS:

- Personal en el sitio con suficiente conocimiento técnico para instalar equipos de GPS montados sobre rodillos y proporcionar información para el funcionamiento del equipo durante el primer día de la operación de campo.
- Información de contacto del personal con los conocimientos técnicos suficientes para ayudar al equipo de investigación con preguntas técnicas durante las pruebas de campo cuando en el sitio técnico la asistencia no está disponible.

Se recomienda el uso de una radio de estación base GPS operando a 900 MHz de vendedores reconocidos. Además de configurar estaciones GPS base, también puede haber otras opciones como una estación de referencia virtual (VRS) y señales de corrección basadas en Internet. Antes del comienzo de la recopilación de datos IC durante la operación de compactación, la configuración del GPS debe validarse utilizando un "receptor móvil" GPS de grado topográfico para garantizar que el GPS montado sobre rodillos proporciona datos de posicionamiento precisos.

4.4 TIPOS DE MEDIDAS DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE

El desarrollo y evaluación de tecnologías de medición de control de compactación continua (CCC) se inició hace más de tres décadas en Europa para su uso en rodillos vibratorios que compactan suelos granulares (Forssblad 1980 y Thurner y Sandström 1980). Desde sus inicios, el concepto se ha ampliado a diferentes tecnologías y materiales de medición y está disponible comercialmente para

diferentes configuraciones de rodillos. Para las configuraciones de rodillo vibratorio, CCC implica la medición y el análisis de la salida de un acelerómetro montado en el tambor de rodillo y puede proporcionar un registro espacial de la calidad de compactación cuando se vincula a mediciones de posición y un sistema de documentación.

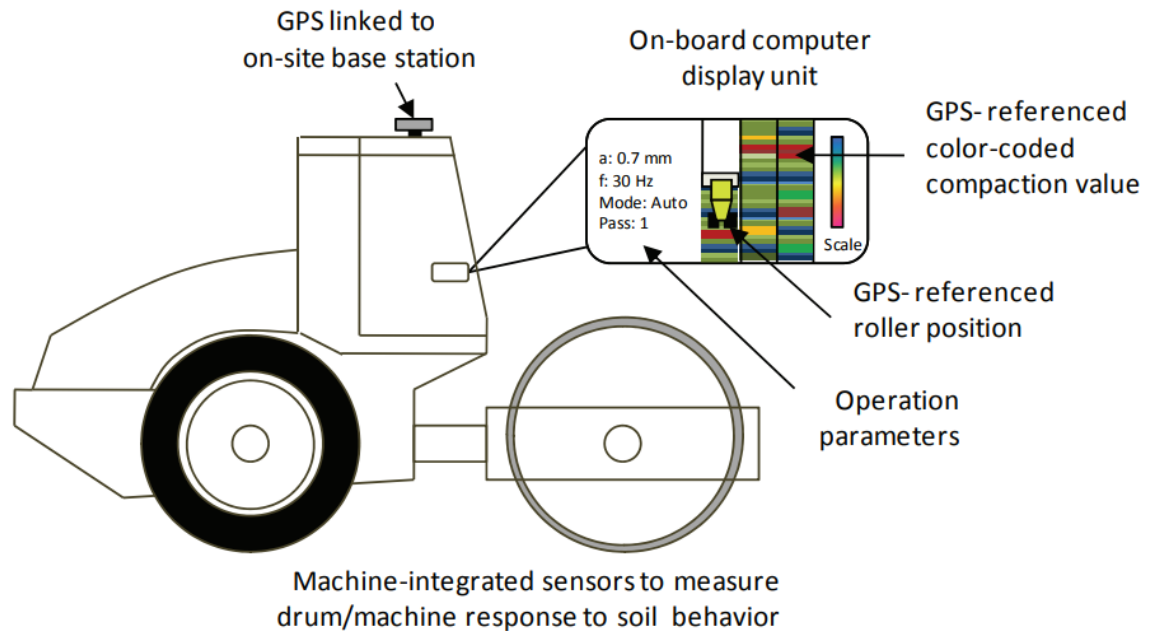


Figura 11. Esquema de un sistema de monitoreo de la compactación (ICMV).

Cuando el sistema de medición proporciona control automático de retroalimentación (AFC) para la amplitud y / o frecuencia de la vibración del rodillo, se lo conoce como compactación "inteligente" (IC). Los valores de medición del rodillo calculados en base a las mediciones del acelerómetro utilizan uno de dos enfoques diferentes:

- calcular una relación de armónicos de frecuencia seleccionados para un intervalo de tiempo establecido, o
- calcular la rigidez del terreno o el módulo elástico en función de un modelo de interacción tambor-suelo y algunas suposiciones.

Una alternativa a las mediciones vibratorias basadas en el acelerómetro es la medición de la resistencia a la rodadura / potencia de accionamiento de la máquina que se puede aplicar a las operaciones de rodillos vibratorios y no vibratorios. Independientemente de la tecnología, la premisa de ICMV es que los valores de medición están relacionados con las mediciones de compactación tradicionales y serán útiles como parte de las operaciones efectivas de movimiento de tierra o compactación de pavimento y las prácticas de QC / QA.

Los valores de medición de IC comúnmente utilizados (ICMV) en los EE.UU. se resumen en la Tabla 5. Estas mediciones se basan en el análisis de frecuencia de vibración o en el modelado mecánico.

IC Measurements	Units	IC Systems	Model Definition
Compaction Meter Value - CMV	None	Caterpillar, Dynapac	$CMV = C \frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}}$
Machine Drive Power - MDP	None	Caterpillar	$MDP = P_g - Wv \left(\sin \alpha + \frac{A'}{g} \right) - (mv + b)$
Compaction Control values - CCV	None	Sakai	$CCV = \left[\frac{A_{0.5\Omega} + A_{1.5\Omega} + A_{2\Omega} + A_{2.5\Omega} + A_{3\Omega}}{A_{0.5\Omega} + A_{\Omega}} \right] \times 100$
Stiffness - K_b	MN/m	Ammann/Case	$k_b = \omega^2 \left[m_d + \frac{m_0 e_0 \cos(\phi)}{z_d} \right]$
Vibration Modulus - E_{vib}	MN/m ²	Bomag	$\frac{\Delta F}{\Delta z_1} = \frac{E_{vib} \cdot 2 \cdot a \cdot \pi}{2 \cdot (1 - v^2) \cdot \left(2.14 + 0.5 \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot (2 \cdot a)^3 \cdot E_{vib}}{(1 - v^2) \cdot 16 \cdot (m_b + m_e + m_r) \cdot g \cdot (d/2)} \right) \right)}$

Tabla 5. Resumen de las medidas de IC.

Actualmente, al menos seis fabricantes (Ammann, Bomag, Case / Ammann, Caterpillar, Dynapac y Sakai) ofrecen ICMV en sus máquinas (tenga en cuenta que Case utiliza la tecnología Ammann ICMV en sus rodillos). Todos los fabricantes emplean métodos patentados de filtrado de datos, grabación y visualización utilizando software propio. En la Tabla 6 se presenta un resumen de las características clave de cada fabricante.

Feature	Ammann/ Case	Bomag	Caterpillar	Dynapac	Sakai	Trimble
ICMV Value	ks (MN/m)	EVIB (MPa)	MDP40 (shown as CCV in the output) and CMV	CMV	CCV	CMV
Single Drum Configuration	Padfoot, Smooth Drum	Smooth Drum	Padfoot and Smooth Drum	Padfoot and Smooth Drum	Smooth Drum	(Retrofit) Smooth Drum
Display Software	ACE-Plus®	BCM05®	AccuGrade®	DCA®	Aithon MT®	AccuGrade®
Output Documentation	Date/Time, Location (Latitude/Longitude/Elevation), Machine length/width, Direction (forward/backward), Vibration (On/Off), Stiffness (ks), Amplitude (actual), Speed, Frequency	Date/Time, Location (Northing/Easting/Elevation at center of the roller drum), EVIB, Frequency, Amplitude (actual), Speed, Jump	Date/Time, Location (Northing/Easting/Elevation of left and right ends of the roller drum), Speed, CCV, CMV, ICMV, Frequency, Amplitude, Direction (forward/backward), Vibration (On/Off)	Location (Latitude/Longitude/Elevation), Direction (forward/backward), CMV, Bouncing, Frequency, Speed, Amplitude	Date/Time, Location (Northing/Easting/Elevation), CCV, Temperature, Frequency, Direction (forward/backward), Vibration (On/Off), GPS Quality	Date/Time, Location (Northing/Easting/Elevation of left and right ends of the roller drum), Speed, CCV, CMV, ICMV, Frequency, Amplitude, Direction (forward/backward), Vibration (On/Off)
Output Export File	*.txt	*.csv	*.csv	*.txt	*.csv	*.csv
Automatic Feedback Control (AFC)	Yes	Yes	No	Yes	No	No

Tabla 6. Aspectos claves de los diferentes sistemas ICMV.

5. DESCUBRIMIENTOS IMPORTANTES³

Los beneficios inmediatos de las tecnologías de IC comunes para las industrias de movimiento de tierras y la pavimentación incluyen:

- El mapeo IC de capas de soporte existentes es efectivo para identificar áreas de soporte débiles para acciones correctivas antes de la compactación de las capas superiores.
- En la Compactación Inteligente de mezclas asfálticas en caliente (HMA), el seguimiento a las pasadas de los rodillos y de las temperaturas superficiales de la mezcla proporcionan los medios necesarios para mantener un patrón de rodadura uniforme dentro de los rangos de temperaturas óptimos para una cobertura del 100% de un área de construcción.
- Las tecnologías de CI pueden ser especialmente beneficiosas para mantener los patrones de rodadura uniformes en condiciones de menor visibilidad, como las operaciones de pavimentación nocturna.
- La tecnología IC tendrá una profunda influencia en las responsabilidades de las diversas etapas de construcción de un pavimento y, finalmente, ayudará a producir mejores y más consistentes productos de pavimento.

5.1 COMPACTACIÓN INTELIGENTE DE SUELOS

Los principales hallazgos con respecto a la Compactación Inteligente de suelos y las capas granulares de subbase y base incluyen:

- La influencia en las profundidades de medición asociadas con varios dispositivos y las condiciones de humedad in situ son los factores principales para la correlación entre ICMV y otros dispositivos de prueba puntuales in situ. Otros factores incluyen diferentes propiedades del material objetivo como la rigidez y la densidad.
- Se mostró una correlación lineal entre el ICMV y la rigidez de la capa recalculada a partir de mediciones de deflexiones, por ejemplo, pruebas de deflectómetro de peso ligero (LWD) y deflectómetro de caída libre (FWD).
- Se encontró una correlación menos deseable entre ICMV y la prueba de carga de placa basada en pruebas de rigidez, y entre el ICMV y los valores de relación de

³ Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology for Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, And Asphalt Pavement Materials - Final Report.

soporte de California (CBR) obtenidos mediante correlaciones con el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP).

- La correlación menos deseable se encontró entre el ICMV y las medidas de los medidores de densidad, tanto nucleares como no nucleares.
- El ICMV también se ve influenciado por factores tales como la configuración de la máquina (frecuencia, amplitud).

Por lo tanto, se recomienda que todas las mediciones en áreas de calibración y áreas de producción durante QA se obtengan con un ajuste de amplitud constante para evitar complicaciones en el análisis e interpretación de los datos.

- La correlación multilínea ha revelado las influencias significativas de múltiples factores en los ICMV, como los contenidos de humedad del suelo y las amplitudes de vibración.
- Usando las curvas de compactación de los datos de IC en una tira de prueba, los pases de rodillo óptimos pueden ser determinados para prevenir la compactación por encima o debajo, siempre que los soportes sean relativamente uniformes.
- Los semivariogramas de los datos de IC se pueden usar para evaluar la uniformidad de compactación que puede ser crucial para un soporte y una capacidad de carga duraderos.

5.2 COMPACTACIÓN INTELIGENTE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Las principales conclusiones con respecto a la Compactación Inteligente de mezclas asfálticas en caliente (HMA, Hot Mix Asphalt) incluyen:

- El mapeo de materiales de soporte existentes utilizando rodillos IC antes de la posterior pavimentación con mezclas asfálticas en caliente se ha demostrado eficaz en la identificación de ubicaciones débiles. Evidencias del campo demostraron que las densidades deseadas de los materiales HMA serían difíciles de lograr en ubicaciones de soporte débiles e incluso fallas prematuras pueden ocurrir con el tráfico de construcción.
- El mapeo se ha realizado con éxito en subbase granular, subbase estabilizada y superficies de asfalto fresadas, con ajustes del rodillo IC, a bajas amplitudes de vibración y bajas frecuencias.
- La correlación entre las densidades de núcleos de HMA y el ICMV es inconsistente debido a factores tales como pruebas puntuales limitadas y la naturaleza diferente

de las propiedades medidas (por ejemplo, propiedades mecánicas vs. proporción de materiales).

- La correlación entre el ICMV y las deflexiones o modulaciones basadas en FWD / LWD indica una correlación lineal relativamente más alta que la que existe entre las densidades del núcleo ICMV y HMA.
- La correlación relativamente baja entre el ICMV y las mediciones de los medidores de densidad nuclear / no nuclear (NG / NNG) pueden deberse a: a) ICMV refleja la rigidez de la totalidad de la estructura del pavimento y el soporte subyacente mientras que NG / NNG solo miden las 6 "superiores de las capas de HMA; b) Los ICMV aún no tienen en cuenta los efectos de la temperatura en las mediciones mientras que las mediciones de NG / NNG son independientes de las temperaturas de HMA.
- El uso de la regresión mutli-lineal ha mejorado el análisis de correlación entre los ICMV y las pruebas puntuales in situ. Estos análisis indicaron las influencias de múltiples factores en ICMV que incluyen los ajustes de la máquina (es decir, amplitud, frecuencia de vibración), las condiciones de las capas subyacentes (es decir, ICMV) y las temperaturas de HMA.
- Los datos de IC se pueden usar para construir una curva de compactación para un material específico de un específico proyecto. La curva de compactación se puede usar para identificar el paso de rodillo óptimo, de modo que se pueda evitar la compactación por exceso / por debajo.
- Los datos de IC se pueden usar para producir semivariogramas que sirven como métricas para la uniformidad de compactación. Generalmente, la uniformidad de compactación aumenta para levantamientos posteriores.

6. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL SISTEMA DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE CON EL SISTEMA TRADICIONAL⁴

Para realizar el análisis comparativo del sistema de compactación inteligente versus al sistema tradicional o convencional, se ha determinado que la mejor forma de comparar la eficiencia es por medio del tiempo que tarde cada uno de estos sistemas en liberar una zona que requirió compactación, para el ejercicio de comparación se tomaron los tiempos en una obra de la siguiente manera:

Se tomó el caso de la empresa Consorcio Vial Oriente 1, que se encuentra reconstruyendo la vía denominada “Concesión del Sisga” que inicia desde la Represa del Sisga y va hasta Aguaclara, Casanare.

En dicha vía se requiere ejecutar algunos mejoramientos de la subrasante para evitar que la estructura del pavimento se deforme de nuevo cuando se reconstruya. Para este propósito se han identificado y demarcado algunas zonas de fallos en las cuales se requiere que se mejore el suelo, realizando una sobre excavación de 0,90 metros de altura o espesor por la longitud afectada y por el ancho de la calzada. Dicha excavación se rellenará en cuatro (4) capas, la primera capa consta de 0,30 metros de rajón y otras tres (3) capas de 0,20 metros de subbase.

El consorcio debe realizar los trabajos en el fallo 24, este fallo tiene de longitud 240 metros, un ancho de vía de 7,2 metros y debe realizarse la sobre excavación de 0,90 metros. Puesto que la vía es muy transitada, sólo se puede trabajar en un carril, es decir en 3,6 metros de ancho, con cierres completos, de ser necesario, de 15 minutos máximo. La interventoría exige registros de la compactación del suelo de cada capa y que el área aprobada por cada registro o ensayo no supere los 400 metros cuadrados, es decir que cada 110 metros lineales se debe realizar un ensayo de densidad o de compactación del suelo.

En un día normal de trabajo donde la lluvia no interrumpa y el material no se retrase, suponiendo que ya se realizó toda la excavación, se colocó y compactó la capa de rajón y se extendió la primera capa de subbase, para la compactación se tienen normalmente los siguientes tiempos de un tramo de 110 metros:

⁴ Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology for Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, And Asphalt Pavement Materials - Final Report.

ACTIVIDAD	TIEMPO (minutos)	OBSERVACIÓN
Primera pasada con el vibrocompactador	20 - 30	Se pasa la máquina antes de humedecer.
Humectación	10 - 15	Pasa el carrotanque 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 vibrocompactador varias veces por el terreno
Revisión de la compactación	10 - 15	Se revisa que superficialmente se observé 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.

Tabla 7. Tiempos de compactación y ensayos sistema tradicional o convencional.



Fotografía 1. Estado de la capa de subbase antes y después de compactar.



Fotografía 2. Estado de la capa de subbase antes y después de compactar.



Fotografía 3. Toma de densidades con cono y arena.

Se anota que una sola muestra no determina si toda el área donde se extrajo se encuentra en óptimas condiciones, por lo que en el futuro es más posible que se generen hundimientos y deformaciones que requieran reparaciones.

En caso de que el grado de compactación mínimo requerido no se obtenga después de varios ensayos o de varias tomas de muestras, se debe proceder a levantar el material para mezclarlo nuevamente y luego si volver a compactar. Esto no solo genera una gran pérdida de tiempo, sino también de material y dinero.

Haciendo esta misma actividad con el sistema de compactación inteligente, se tendrían los siguientes tiempos:

ACTIVIDAD	TIEMPO (minutos)	OBSERVACIÓN
Primera pasada con el vibrocompactador	20	Se pasa la máquina antes de humedecer.
Humectación	10 - 15	Pasa el carrotanque 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 vibrocompactador 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.

Tabla 8. Tiempos de compactación con el sistema inteligente.

Es de anotar que el sistema de compactación inteligente permite trabajar seguidamente las tres capas en toda la longitud de 240 metros.

A continuación se enumeran las diferencias de tiempo en compactación de ambos sistemas, en el mejor de los casos (que no se tenga que levantar el material para volverlo a compactar) y el peor (que tuviera que levantarse la capa completa con el sistema convencional o un área específica con la compactación inteligente).

- En el primer ejercicio la diferencia entre compactación convencional y compactación inteligente, teniendo el mejor escenario posible, el tiempo de compactación se reduce en 45 minutos, sin olvidar que con la compactación inteligente se tiene registro de toda el área compactada y no se limita al resultado de un ensayo puntual por cada 400 m².
- En caso desfavorable la diferencia entre el sistema convencional y el sistema inteligente en tiempo es de 125 minutos, siempre y cuando no se tenga que tomar más de tres ensayos porque alguno no dio o no se cumple el parámetro estadístico establecido por la especificación.
- Para este ejercicio se consideró el mismo tiempo de compactación con el vibrocompactador normal y el que tiene adaptado el sistema de compactación

inteligente, aunque es lógico que el de compactación inteligente va a requerir menos tiempo porque se liberan los sectores que alcancen el parámetro de control requerido evitando sobrecompactar.

- d. La disminución del porcentaje de tiempo ahorrado por el uso de la tecnología de compactación inteligente en un tramo de 110 metros, presenta el mejor caso de 72.72% y el caso desfavorable 52.83%.
- e. En el sistema de compactación inteligente no depende de medidas subjetivas, ni de laboratorio mediante ensayos, ya que todo se registra y verifica en tiempo real, eliminando la oportunidad de que se presenten errores humanos.

7. CONCLUSIONES

Se evidencia que el sistema de compactación inteligente requiere mucho menos tiempo que el sistema tradicional, midiendo parámetros de rigidez en toda el área compactada, que representan mejor la resistencia del suelo y no tomando medidas indirectas como la densidad que se verifica con los resultados del ensayo de laboratorio que pueden no ser representativos de la totalidad del material utilizado.

Al requerir menos tiempo con el sistema de compactación inteligente, los recursos que va a ahorrar el contratista son mayores, como el combustible que gastan las máquinas, el tiempo de trabajo de todos los operadores, el laboratorio, y la ejecución adelantada de los reprocesos de estabilización cuando se identifican tempranamente zonas que no se alcanzan el grado de compactación requerido. También se ahorra porque se identifican y delimitan exactamente las zonas que requieren menos pasadas del compactador, evitando degradar el material.

Se evidencia que con la tecnología de compactación inteligente se puede reducir en el tiempo de ejecución y aprobación de una capa en un 27.28% o 47.17% con relación al que requiere el sistema tradicional, recuperando en corto tiempo la inversión y mejorando las ganancias de los contratistas, ya que al ejecutar la obra en un tiempo menor al presupuestado aumentan los rendimientos y disminuyen los gastos de administración y alquiler de equipos, entre otros.

El sistema inteligente de compactación al generar capas homogéneas y de mayor rigidez que el sistema tradicional, a la vez evita sobrecostos por mayores cantidades de obra en el momento de pavimentar, permite tanto al dueño de la obra como a los constructores e interventores tener una mayor seguridad de capas homogéneas y aportarán a la estructura una resistencia igual o mayor a la supuesta en las hipótesis de diseño. Esto repercutirá en que se disminuyan los riesgos de falla asociados a la construcción y en la medida que se presente una menor cantidad de daños durante la etapa de garantía, el contratista podrá disminuir sus costos y en un futuro el valor de las pólizas de seguros.

El sistema inteligente de compactación, es un sistema que revoluciona la industria de la construcción, ya que reduce los tiempos de compactación, genera datos precisos sobre toda el área intervenida, evita reprocesos y pérdida de dinero del Contratista. También ayuda al medio ambiente ya que reduce el uso de las máquinas y el gasto masivo de combustible.

BIBLIOGRAFÍA

Anjan Kumar, Siddagangaiah; Aldouri; Raed; Nazarian, Soheil y Si, Jimmy. Accelerated assessment of quality of compacted geomaterials with intelligent compaction technology. Construction and Building Materials. Vol.113. June 2016.

Barman, Manik; Nazari, Moeen; Imran, Syed; Commuri, Sesh; Zaman, Musharraf y Beainy, Fares; Singh, Dharamveer. Quality control of subgrade soil using intelligent compaction. Innovative Infrastructure Solutions. Vol. 1. 2016.

Beainy, Fares; Commuri, Sesh y Zaman, Musharraf. Quality assurance of hot mix asphalt pavements using the intelligent asphalt compaction analyzer. Journal of Construction Engineering and Management. Vol.138. February 2012.

Commuri, Sesh; Mai, Anh T. y Zaman, Musharraf. Neural network-based intelligent compaction analyzer for estimating compaction quality of hot asphalt mixes. Journal of Construction Engineering and Management. Vol. 137. September 2011.

Hu, Wei; Shu, Xiang; Huang, Baoshan y Woods, Mark. Field investigation of intelligent compaction for hot mix asphalt resurfacing. Frontiers of Structural and Civil Engineering. Vol.11. 2017.

Jackson, Lisa. Intelligent compaction. Communication Product Updates. Public Roads. Vol. 78. 2015.

Jelusic, Primož. Soil compaction optimization with soft constrain. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. Vol. 29. May 2015.

Mansa, Rachel F.; Bridson, Rachel H.; Greenwood, Richard W.; Barker, Helen y Seville, Jonathan P.K. Using intelligent software to predict the effects of formulation and processing parameters on roller compaction. Powder Technology. Vol.181. 2008.

Minchin, R. Edward, Jr.; Swanson, David C.; Gruss, Alexander F. y Thomas, H. Randolph. Computer applications in intelligent compaction. Journal of Computing in Civil Engineering. Vol. 22. 2008.

Rubenstone, Jeff. Volvo rolls out its intelligent compaction tech. Vol. 274. May 2015.

Savan, Christopher M.; Ng, Kam W. y Ksaibati, Khaled. Benefit-cost analysis and application of intelligent compaction for transportation. Transportation Geotechnics. Vol. 9. December 2016.

Sleight, Chris. Intelligent compaction: IRN looks at some of the new compaction equipment available, including machines from JCB, Hamm, Paclite and Weber MT. We start, however, with Chris Sleight's report on the latest tandem rollers from Bomag. (COMPACTION). International Rental News, July, 2011, Vol.11(5), p.35(1).

Van Hampton, Tudor. Intelligent compaction is on a roll. Vol. 263. January 2009.

Xu, Qinwu y Chang, George K. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials. Automation in Construction. Vol. 30. March 2013.

Xu, Qinwu y Chang, George K.; Gallivan, Victor L.; Horan, Robert D. Influences of intelligent compaction uniformity on pavement performances of hot mix asphalt. Construction and Building Materials. Vol. 30. May 2012.

Xu, Qinwu y Chang, George K. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials. Automation in Construction. Vol. 30. March 2013.

Xu, Qinwu y Chang, George K. Experimental and numerical study of asphalt material geospatial heterogeneity with intelligent compaction technology on roads. Construction and Building Materials. Vol. 72. December 2014.

Xu, Qinwu; Chang, George K. y Gallivan, Victor L. Development of a systematic method for intelligent compaction data analysis and management, (Statistical data) (Abstract). Construction and Building Materials. Vol.37. December 2012.

Xu, Qinwu; Chang, George K. y Gallivan, Victor L. Development of a systematic method for intelligent compaction data analysis and management. Construction and Building Materials. Vol. 37. December 2012.

Xu, Qinwu; Chang, George K. y Gallivan, Victor L. A Sensing-Information-Statistics Integrated Model to Predict Asphalt Material Density with Intelligent Compaction System. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Vol. 20 December 2015.

Xu, Qinwu; Chang, George K.; Gallivan, Victor L. y Horan, Robert D. Influences of intelligent compaction uniformity on pavement performances of hot mix asphalt. Construction and Building Materials. Vol. 30. May 2012.

Zhu, Xingyi; Bai, Shunjie; Xue, Genping; Yang, Jian; Cai, Yongsheng; Hu, Wei; Jia, Xiaoyang y Huang, Baoshan. Assessment of compaction quality of multi-layer pavement structure based on intelligent compaction technology. Construction and Building Materials. Vol.161. February 2018.